ÉLÉMENTS

DE PHYSIQUE.

LIBRAIRIE DE GERMER BAILLIÈRE.

COURS DE CHIMIE ÉLÉMENTAIRE

AVEC SES PRINCIPALES APPLICATIONS AUX ARTS ET A LA MÉDECINE.

Par A. Bouchardat, pharmacien en chef de l'Hôtel-Dieu de Paris, agrégé de la Faculté de médecine de Paris. 2 vol. in-8, avec 4 pl. représentant les instruments de chimie. 9 fr.

NOUVEAUX ELÉMENTS D'HISTOIRE NATURELLE,

Comprenant la zoologie, la botanique, la minéralogie et la géologie, un fort vol. grand in-18, de 970 pages, avec 44 planches gravées sur acier, et représentant 400 sujets; par A. Salacroux, docteur en médecine de la Faculté de Paris, professeur d'histoire naturelle au collége royal Saint-Louis, membre de la Société des sciences naturelles de France. 7 fr.

PETITES CHIMIE ET BOTANIQUE DES ÉCOLES,

Ou Notions élémentaires de ces deux sciences, par un professeur, ancien élève de l'école Polytechnique. Paris, 1835, 1 vol. in-18. 1 fr. 50 c.

SPURZHEIM. Essai philosophique sur la nature morale et intellectuelle de l'homme. Paris, 1820, 1 vol. in-8. 4 fr. 50 c.

SPURZHEIM. Essai sur les principes élémentaires de l'éducation. Paris, 1822, 1 vol. in-8. 3 fr. 50 c.

MANUEL DU BACCALAURÉAT ES-SCIENCES,

Contenant les mathématiques, la physique, la chimie, la botanique, la zoologie, la minéralogie et la géologie, rédigé suivant le programme de l'Université, par M. Aimé, ancien élève de l'Ecole Normale de Paris, et Bouchardat, pharmacien en chef de l'Hôtel-Dieu, agrégé de la Faculté de médecine de Paris, 1837. 1 fort vol. in-18 de 800 pag. avec figures. 6 fr.

SIMON (de Metz), Nouveau traité d'hygiène de la jeunesse, suivi des Maladies les plus fréquentes à cet âge. 1835. 1 vol. in-8. 3 fr. 50 c.

IMPRIMERIE DE E. DUVERGER, RUE DE VERNEUIL, N. 4



ÉLÉMENTS

DE PHYSIQUE

PAR C. C. PERSON,

Docteur en médecine, docteur ès-sciences, agrégé à l'Université pour les sciences physiques et mathématiques, agrégé à la Faculté de médecine de Paris pour la physique, membre des Académies de Rouen et de Nancy, professeur de physique de la ville et du collége royal de Rouen.

Sur la Chaleur

SECONDE PARTIE.

E. K. L. Medical Library

PARIS

GERMER BAILLIÈRE, LIBRAIRE-ÉDITEUR,

RUE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE, N. 13 *bis*.

LIBRAIRIE CLASSIQUE DE POILLEUX,

QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, N° 57.

Lyon, SAVY jeune, quai des Célestins 49. | Londres, BAILLIÈRE, 219, Regent street.
Strasbourg, DERIVAUX ET LEVRAULT. | Lyon, SAVY, Quai des Célestins, 49.

1837


WELLCOME
HISTORICAL
MEDICAL
LIBRARY

TABLE MÉTHODIQUE

DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LA SECONDE PARTIE.

LIVRE SIXIÈME.

CHALEUR.

FIN DE LA TABLE MÉTHODIQUE.

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE.

LIVRE SIXIÈME.

CHALEUR.

CHAPITRE PREMIER.

TEMPÉRATURES.

§ Ier. *Mesure des températures.*

830. La *chaleur* consiste dans un mouvement vibratoire de la matière impondérable et des derniers atomes des corps. *La sensation de chaleur* n'est pas autre chose que la sensation qu'occasionne ce mouvement quand il a lieu dans nos organes. Mais on n'arrive à connaître ainsi la chaleur dans sa nature même qu'après une étude assez approfondie des phénomènes; de sorte que nous nous contenterons d'abord d'une définition *empirique* qui la caractérisera, sans rien préjuger sur sa nature; la *chaleur* sera pour nous la *cause* d'une sensation *sui generis* qui peut affecter presque tous nos organes, et qui se manifeste, par exemple, quand le soleil nous frappe ou quand nous approchons d'un foyer.

Définition rationnelle de la chaleur.

Définition empirique.

831. Il ne serait pas philosophique de recourir à une cause particulière pour expliquer le *froid*; la *privation de chaleur* suffit; c'est l'opinion généralement admise, et cette opinion s'accorde avec tous les faits connus.

Ce que c'est que le froid.

832. Nous étudierons d'abord les effets de la chaleur, puis nous examinerons la chaleur elle-même. Dans la pre-

Ordre dans l'étude de la chaleur.

mière partie nous verrons les températures, les changements de volume et les changements d'état; dans la seconde nous nous occuperons de la mesure de la chaleur, de sa propagation et de sa nature.

Température. 833. La *température* est l'état d'un corps considéré comme chaud ou comme froid. On appelle corps chauds ceux qui donnent de la chaleur, corps froids ceux qui en enlèvent. Il faut observer que, d'après cette définition, les corps froids peuvent contenir de la chaleur; nous verrons même qu'aucun corps n'en est absolument privé.

Distinction entre la chaleur et la température. 834. De ce qu'un corps, à un instant donné, nous transmet plus de chaleur qu'un autre, nous n'avons pas le droit de conclure qu'il en contient davantage. Il ne faut donc pas confondre la chaleur avec la température; et pour citer un exemple qui mette cette distinction dans tout son jour, nous pouvons dire d'avance, qu'à poids égal, il y a plus de chaleur dans l'eau bouillante que dans le fer rouge, quoique évidemment la température de celui-ci soit plus élevée.

Les sens sont le premier moyen d'apprécier la température. 835. Lorsque nos sens sont dans l'état normal, il nous font reconnaître les *différences* de température avec assez d'exactitude : ainsi, on n'a pas besoin d'instrument pour savoir que l'hiver est plus froid que l'été, que l'eau, dans telle ou telle circonstance, s'échauffe ou se refroidit, etc.

Cas où ils sont en défaut. Mais dans plusieurs cas les sens nous trompent, ou sont hors d'état de nous donner les indications dont nous avons besoin. Que l'une des mains soit chaude et l'autre froide, et qu'on les plonge dans l'eau à une température moyenne, le liquide paraîtra chaud pour l'une et froid pour l'autre, de sorte qu'il y aura contradiction. Les caves profondes ont, comme nous le verrons, constamment la même température; et cependant elles nous paraissent plus chaudes en hiver qu'en été. Comment constater avec les sens que tel jour, à telle heure, il faisait plus froid à Saint-Pétersbourg qu'à Paris? Ou que tel jour de cette année a été plus chaud que le pareil jour de l'année dernière?

Ce que c'est que le thermomètre en général. 836. Pour remédier à l'imperfection des sens on a recours à divers instruments, connus sous le nom de *thermo-*

mètres, nom peut-être impropre, parce qu'il fait croire que ces instruments mesurent la *chaleur*, tandis qu'ils ne font qu'*indiquer la température*, et ne sont en définitive que le sens de la chaleur perfectionné sous certains rapports.

Thermomètre de Drebbel.
Fig. 289.

837. Qu'on prenne un ballon à col long et étroit, qu'on le renverse dans un vase plein d'eau comme l'indique la figure, et qu'on l'échauffe légèrement, par exemple, en brûlant un peu de papier au-dessous : on fera sortir ainsi quelques bulles d'air; ensuite, par le refroidissement, l'eau montera à une certaine hauteur, par exemple en A. Maintenant avec cet appareil on pourra constater trois choses :

Principes sur lesquels il est fondé.

1° Quand on échauffe l'air il se dilate; 2° quand on le refroidit, il diminue de volume ; 3° quand la température reste la même, le volume reste le même aussi.

Usages.

Voilà donc un instrument qui pourra, plus exactement que nos sens, nous dire s'il fait plus chaud aujourd'hui qu'hier; plus froid dans un lieu que dans un autre. La température d'un appartement sera *définie* par la hauteur de l'eau, et toutes les fois que cette hauteur sera la même, il ne fera ni plus chaud ni plus froid, puisque la plus faible chaleur ou le plus léger refroidissement changent le volume de l'air, et par conséquent le niveau de l'eau.

Défaut principal.

838. Telle était du moins l'idée qu'on se faisait d'abord de ce thermomètre imaginé vers 1600, par un physicien hollandais nommé Drebbel. Mais après l'invention du baromètre en 1643, on lui reconnut un défaut capital; c'est que la hauteur de l'eau peut changer, quoique la température reste la même. En effet, on sait par le baromètre que la pression de l'atmosphère est tantôt plus forte, tantôt plus faible; si elle augmente, elle fait évidemment monter l'eau sans qu'il y ait eu de refroidissement; donc les indications du thermomètre de Drebbel peuvent être fautives. On a d'après cela renoncé à cet instrument, mais les principes sur lesquels il est fondé servent encore de base à la construction des thermomètres plus parfaits qu'on possède aujourdhui; de sorte que les températures se trouvent toujours indiquées par les différents volumes que prend un certain corps.

Construction du thermomètre à mercure. Choix du tube.

839. Nous examinerons spécialement le *thermomètre à mercure*, qui est réellement le meilleur thermomètre; voyons d'abord comment on le construit.

Choix du tube.

1° On choisit un tube capillaire dont le diamètre intérieur soit partout le même. Pour s'en assurer on y fait entrer une petite colonne de mercure qu'on promène dans le tube ; si elle a partout la même longueur, il est évident que le tube est bien calibré.

Formation du réservoir.

2° On souffle une boule à une extrémité. Pour cela on ramollit et on ferme à la lampe un des bouts du tube, après avoir attaché à l'autre une petite bouteille de caoutchouc. Quand le verre est ramolli, il suffit de presser la bouteille pour produire une boule. Si on soufflait avec la bouche on introduirait de la vapeur d'eau, dont il serait difficile de se débarrasser.

Introduction du mercure. Fig. 290.

3° L'étroitesse du tube ne permet pas d'y introduire directement le mercure, mais voici comment on s'y prend : Après avoir détaché la bouteille de caoutchouc, on chauffe sur des charbons la boule qu'on a soufflée; l'air dilaté par la chaleur sort en partie du tube dont on plonge alors tout à coup l'extrémité ouverte dans du mercure. Par le refroidissement, la force élastique de l'air restant diminue, et la pression de l'atmosphère fait monter une certaine quantité de mercure dans la boule. Pour la remplir entièrement, il faut maintenant faire bouillir le mercure qu'elle contient en l'exposant avec précaution sur des charbons. La vapeur mercurielle formée par l'ébullition chasse l'air ; on plonge alors de nouveau l'extrémité ouverte dans du mercure ; et comme la vapeur repasse bientôt à l'état liquide par le refroidissement, il se fait un vide où la pression atmosphérique fait monter le métal. Presque toujours cependant il reste une petite bulle d'air à l'entrée de la boule ; on l'en chasse en faisant faire rapidement au thermomètre quelques tours dans lesquels le tube décrit la grande circonférence. Le mercure acquérant une force centrifuge plus grande que l'air, à cause de sa masse, s'éloigne du centre de rotation, et force par conséquent la bulle à s'en rapprocher (55).

On règle et on ferme.

4° Supposons l'appareil entièrement rempli ; en chauf-

fant la boule, on chasse une portion du mercure telle que l'extrémité de la colonne reste dans le tube à toutes les températures qu'on veut observer; c'est une affaire de tâtonnement. On ferme ensuite le tube sans y laisser d'air; pour cela on effile l'extrémité à la lampe, puis on chauffe la boule de manière à faire venir le mercure tout près de cette extrémité qu'on ferme alors au chalumeau. Quand le mercure se contracte par le refroidissement, il laisse le tube vide, ou du moins ne contenant qu'une très petite quantité d'air, ce qui n'a pas d'inconvénient. Si on laissait la totalité de l'air, le mercure en se dilatant ferait casser l'instrument. On pourrait à la rigueur ne pas fermer; mais il entrerait alors de la poussière dans le tube, et si dans quelque mouvement, une portion du mercure venait à sortir, la graduation, faite comme nous le dirons tout à l'heure, deviendrait fautive.

840. On sent l'utilité du réservoir que forme la boule; si on avait un simple tube fermé par un bout et de même longueur que celui du thermomètre, une très forte chaleur allongerait la colonne seulement de quelques millimètres; tandis qu'ici la boule, ayant une capacité à peu près invariable, la dilatation du mercure qu'elle contient se loge dans le tube et augmente considérablement la longueur de la colonne. On se sert même de tubes aplatis, afin que cette dilatation occupe une plus grande longueur. Utilité du réservoir.

841. Les changements dans la pression de l'air sont ici sans influence, puisque l'instrument est fermé. D'ailleurs fût-il ouvert, il en serait encore de même, parce que les liquides, et surtout le mercure, sont à peu près incompressibles (374). Ainsi, tous les changements qu'on reconnaît, indiquent des changements de température; de sorte qu'on a déjà tous les avantages du thermomètre de Drebbel, sans en avoir les inconvénients. La pression de l'air est sans influence.

842. Le principal avantage qu'on attende d'un thermomètre est la comparaison des températures. Il faut donc adopter une graduation telle, que deux thermomètres donnent exactement la même indication quand on les place dans les mêmes circonstances. On a d'abord employé pour Recherche d'un thermomètre comparable.

cela des moyens assez pénibles; mais enfin, deux physiciens, Christin, à Lyon, et Celsius, à Upsal, ont presque simultanément trouvé en 1741 un mode de graduation très simple, qui donne des thermomètres parfaitement comparables, quelles que soient les dimensions, et sans qu'on ait besoin de connaître le rapport entre les divisions du tube et la capacité de la boule. Ce procédé est fondé sur deux faits qu'on peut aisément constater avec l'instrument sans graduation; c'est 1° que la glace se fond toujours à la même température ; 2° que la vapeur de l'eau bouillante a toujours la même température sous la même pression.

Températures fixes qui servent à sa construction.

Procédé pour marquer les points fixes.

843. Voici maintenant comment on s'y prend pour marquer les deux températures fixes sur le tube : On met dans une chambre, où il ne gèle pas, un vase contenant de la glace pilée, ou de la neige qui bientôt commence à fondre; on y plonge le thermomètre et on voit le mercure descendre, puis s'arrêter à une hauteur invariable; de sorte qu'il est facile de marquer exactement cette hauteur. Il est bon que le vase soit percé de trous, afin que l'eau puisse s'écouler, et que le thermomètre soit toujours en contact avec la glace fondante. Pour avoir ensuite la hauteur correspondante à l'eau bouillante, on se sert d'un vase en fer-blanc, dont le couvercle est surmonté d'un tuyau en plusieurs pièces pour qu'on puisse lui donner la longueur convenable. La pièce supérieure est fermée par un bouchon B dans lequel passe à frottement le tube du thermomètre. Le vase contient un peu d'eau qu'on fait bouillir; il vaut mieux que le thermomètre ne plonge pas, parce que la vapeur a une température plus invariable encore que celle du liquide; cette vapeur sort par une ouverture latérale après avoir échauffé toute la colonne de mercure. On élève le tube du thermomètre à travers le bouchon, seulement jusqu'à ce que l'on voie le sommet de la colonne qu'on marque lorsqu'il est stationnaire.

Fig. 291.

Remarque sur le point fixe supérieur.

844. Nous avons dit que la vapeur sortant de l'eau bouillante avait toujours la même température, pourvu que la pression fût la même. Il faut donc que ce soit sous une *même* pression qu'on marque le second point fixe de tous

les thermomètres. Les physiciens sont convenus de prendre cette pression de $0^m, 76$. Mais il n'est pas nécessaire d'attendre que le thermomètre soit précisément à cette hauteur. Nous verrons (1037) qu'on peut à l'aide d'un petit calcul se dispenser d'attendre ainsi.

845. L'intervalle compris entre les deux points fixes se divise en 100 parties égales qu'on appelle degrés. On marque 0 au point correspondant à la glace fondante et 100° au point qui répond à l'eau bouillante. Au-dessus et au-dessous de cet intervalle, on porte autant de degrés que la longueur du tube peut en contenir; mais il est inutile d'en porter plus de 40 au-dessous de zéro, parce que à cette température le mercure est gelé; et d'aller au-delà de 360, parce que le métal commence alors à bouillir. Graduation du thermomètre.

846. Les degrés s'indiquent en écrivant un petit zéro au au-dessus et à droite du nombre, ainsi 25° signifie 25 degrés. Pour distinguer les degrés au-dessous de zéro, on le fait précéder du signe —; de sorte que —10° signifie 10° au-dessous de zéro. Manière d'écrire les températures.

847. On a reconnu dernièrement que les points fixes s'élevaient peu à peu dans les thermomètres nouvellement construits; de sorte que, par exemple, le point de la glace fondante, déterminé par une expérience nouvelle, pouvait se trouver d'un ou même de deux degrés au-dessus de zéro marqué sur l'instrument. Il est certain que cette élévation est due en partie à une diminution du réservoir par la pression de l'air; mais, comme on l'observe encore dans les thermomètres qui sont restés ouverts, on l'attribue à la lenteur que met le verre à reprendre son état primitif après qu'on l'a chauffé, soit pour souffler la boule, soit pour faire bouillir le mercure. Il paraît que l'élévation du zéro s'arrête au bout d'un an ou deux, de sorte qu'il serait bon de ne marquer les points fixes qu'au bout de ce temps. On voit de plus qu'on court risque d'altérer la graduation de son thermomètre si on le soumet à une température très élevée. Élévation du zéro.

848. Le thermomètre à alcool se construit exactement comme le thermomètre à mercure. Ordinairement on co- Thermomètre à alcool.

lore l'alcool en rouge par de l'*orseille*, matière préparée avec certains lichens.

Comparaison des deux thermomètres.

849. Les thermomètres à alcool et à mercure ne sont rigoureusement d'accord que pour les points fixes 0° et 100°. Dans l'intervalle, le thermomètre à alcool est toujours en arrière, c'est-à-dire qu'il désigne la même température par des nombres plus petits; par exemple, il marque 10° quand l'autre en marque 12,5; il s'arrête à 50° quand l'autre va jusqu'à 62°,5, de sorte que la différence peut être de plus de 12°.

Avantages du thermomètre à alcool.

850. Les avantages du thermomètre à alcool sont 1° de pouvoir indiquer des températures très basses, l'alcool pur ne gelant jamais; 2° de donner, toutes choses égales, des degrés plus longs, parce que l'alcool se dilate beaucoup plus que le mercure.

Ses inconvénients.

851. Par compensation ce thermomètre ne peut indiquer les températures élevées; car au-delà de 100° la vapeur alcoolique a assez de force pour briser l'instrument. De plus, il est très lent à prendre la température, ce qui induit souvent en erreur; on le croit stationnaire, quand il ne l'est pas encore. Un inconvénient capital, c'est que l'alcool qu'on met dans les différents thermomètres est loin d'être identique; aussi deux instruments de ce genre sont rarement d'accord. Le capitaine Parry, qui dans ses voyages vers le pôle avait emporté dix thermomètres à alcool, construits par les meilleurs artistes, a vu quelquefois entre eux des différences de 17° de la division anglaise (854).

Avantages du thermomètre à mercure.

852. Le mercure au contraire a l'avantage bien précieux de pouvoir être obtenu facilement d'une pureté parfaite, ce qui permet de construire des thermomètres parfaitement comparables. Comme il ne bout qu'à 350° à l'air libre, il peut aller jusqu'à 360° dans le thermomètre, la pression due à la colonne de mercure retardant l'ébullition. Ses indications sont bien plus rapides que celles du thermomètre à alcool. Enfin entre zéro et 100° les variations sont proportionnelles à la chaleur qu'il absorbe, c'est-à-dire que pour le faire varier de 10, 20, 30° dans une partie quel-

conque de cet intervalle il faut lui donner précisément 10, 20, 30 fois autant de chaleur que pour le faire monter de 0° à 1°. Nous verrons plus loin comment on constate cette propriété importante qui n'appartient pas au thermomètre à alcool.

853. Quand l'intervalle entre la glace fondante et l'eau bouillante est divisé en 100° le thermomètre s'appelle *centigrade;* dans le thermomètre de *Réaumur* cet intervalle est divisé en 80 parties; de là il suit que chaque degré de Réaumur vaut un degré centigrade plus un quart. Si donc on demande ce que valent 16° de Réaumur, on répondra qu'ils valent 16° centigr. + 16 quarts, en tout 20° centigr. Il est facile de généraliser.

Échelle de Réaumur.

Conversion des degrés de Réaumur en degrés centigrades.

854. Le thermomètre de Fahrenheit, qui est adopté en Angleterre, n'a pas la glace fondante pour point fixe inférieur; son zéro est donné par un certain mélange de neige et de sel, et le point de l'eau bouillante est marqué 212. Son 32e degré répond à notre 0; d'où il suit que l'intervalle que nous divisons en 100 parties est dans ce thermomètre divisé en 180, et que par conséquent 9° F valent 5° C. Maintenant si je veux convertir 86° F par exemple en degrés centigr., j'observe qu'entre 32° et 86° il y a 54°; or évidemment autant de fois j'aurai 9 dans ce nombre autant de fois j'aurai 5° C; c'est par conséquent 30° C. On peut de cet exemple particulier tirer cette règle générale : Du nombre donné retranchez 32, multipliez le reste par 5 et divisez par 9; le quotient est le nombre cherché. Si le nombre donné était plus petit que 32, on tomberait sur un résultat négatif en appliquant la règle, et en effet on doit dans ce cas trouver des degrés au-dessous de zéro.

Échelle de Fahrenheit.

Conversion des degrés de Fahrenheit en degrés centigrades.

Fig. 292.

855. Il y a des thermomètres qui, sans qu'on ait besoin de les observer continuellement, donnent la plus haute et la plus basse température qui aient eu lieu dans un certain intervalle de temps; le meilleur instrument de ce genre est le thermomètre de *Six* modifié par *Bellani*. Le réservoir R contient de l'alcool qui s'étend jusqu'en M; de M en M′ il y a du mercure. Quand l'alcool R et le mercure M M′ se dilatent, l'extrémité M′ de la colonne pousse une petite boule d'émail B terminée par une petite queue recourbée

Thermomètre a maxima et a minima.

Fig. 293.

Fig. 294. qui la tient à frottement dans le tube, de sorte qu'elle reste à l'endroit où le mercure l'a fait monter, indiquant ainsi la plus haute température qui ait eu lieu. Dès qu'il y a refroidissement, l'alcool R se contracte, le mercure M qui le suit pousse à son tour une petite boule d'émail qui marque les minima de température. Pour faire l'observation de la journée, on met le matin les deux petites boules en contact avec le mercure; cela se fait avec un aimant qui les attire où l'on veut à cause d'un petit morceau de fil de fer qui est contenu dans leur queue. L'instrument se compose comme on voit de deux thermomètres qui doivent toujours être d'accord. On détermine leurs points zéro avec de la glace ; le reste de la gradation se fait par des comparaisons de 10 en 10° avec un bon thermomètre étalon, vu que le tube qui est un peu gros n'est jamais bien cylindrique et que d'ailleurs ces thermomètres ne vont pas jusqu'à 100°. Les degrés de celui qui donne les maxima sont un peu plus grands, puisqu'ils sont dus à la dilatation réunie de l'alcool et du mercure. L'appareil doit être suspendu verticalement pour éviter le mélange des liquides. La colonne qui est au-dessus de M′ a pour usage de forcer le mercure à suivre toujours l'alcool quand il remonte vers le réservoir en se contractant.

Mesure des hautes températures.

Pyromètre de Wedgewood.

Fig. 295.

856. Les instruments qui servent à mesurer les hautes températures portent le nom de *pyromètres*. Le plus connu est le pyromètre de *Wedgewood*; il est fondé sur le *retrait* de l'argile, c'est-à-dire sur la propriété qu'a cette substance de diminuer de volume à mesure que la température s'élève, et de conserver cette diminution après le refroidissement. On fabrique dans un même moule de petits cylindres d'argile, et, pour apprécier facilement leurs changements de volume, on a deux règles de cuivre soudées sur une plaque de même métal, et formant un angle entre elles. Le cylindre présenté à l'ouverture de l'angle pénètre d'abord jusqu'à un certain point marqué O. Quand ensuite il a été soumis, par exemple, à la température où le cuivre commence à se fondre, il peut s'enfoncer davantage, et le point où il s'arrête est marqué 27° sur l'instrument. On dit d'a-

près cela que le cuivre fond au 27e degré du pyromètre de Wedgewood. Le premier instrument de ce genre a été gradué arbitrairement; les autres ont été faits d'après cet étalon. Cependant leurs indications ne sont pas exactement comparables, parce que l'argile n'est pas identique dans les différents lieux et que son retrait dépend non-seulement de la température, mais aussi du temps pendant lequel agit la chaleur.

Ses défauts.

857. Après avoir examiné les instruments propres à mesurer les températures, voyons maintenant comment on s'en sert. Prendre la température d'un corps avec un thermomètre, c'est amener l'instrument à avoir la même température que le corps que l'on considère. Soit, par exemple, une masse d'eau chaude dont on veut prendre la température; on y plonge le thermomètre; la chaleur fait monter le mercure qui s'arrête bientôt à une certaine hauteur. L'eau continue sans doute à donner de la chaleur à l'instrument, mais celui-ci en rend autant qu'il en reçoit puisqu'il reste stationnaire. D'après cela, le thermomètre considéré comme donnant de la chaleur est dans le même état que l'eau qui le touche, c'est-à-dire qu'il est à la même température. On a donc la température de l'eau en lisant l'indication thermométrique.

Ce que c'est que prendre la température.

858. On doit s'assujettir à certaines précautions pour faire une observation thermométrique bien exacte. Observons d'abord qu'en général le thermomètre altère la température qu'il s'agit de prendre. Ici, par exemple, la chaleur reçue par l'instrument a diminué d'autant celle de l'eau. On peut négliger cette erreur quand la masse d'eau est assez considérable par rapport au thermomètre, et en général toutes les fois que la chaleur absorbée par l'instrument ne change pas sensiblement la température du corps que l'on considère.

Précautions pour prendre la température.

1° Il faut que la chaleur absorbée par le thermomètre n'altère pas sensiblement la température à mesurer.

859. Il est évident que, pour prendre exactement la température d'un corps, le thermomètre doit être de toute part en contact avec lui. S'il s'agit, par exemple, d'une barre de fer, il ne suffira pas de la toucher avec l'instrument; il faudra y creuser une cavité dans laquelle on mettra du mer-

2° L'instrument doit être en contact de toutes parts avec le corps dont on veut prendre la température.

cure pour y placer ensuite un petit thermomètre. A la rigueur, on doit plonger le tube lui-même jusqu'au point où le mercure peut monter; autrement les observations ne seraient pas comparables, puisque la quantité de mercure qui reste dans la boule étant variable, on soumettrait à l'action de la chaleur dans les différents cas des quantités de mercure différentes qui pourraient présenter la même dilatation sans avoir la même température. Dans l'usage ordinaire, on omet souvent cette précaution, et l'erreur est en effet négligeable, quand le tube est très fin par rapport au réservoir, ou quand la différence de température n'est pas grande; mais dans les observations rigoureuses il faut y avoir égard (937 4°).

3o Il faut que le thermomètre soit stationnaire.

860. Un point capital, c'est d'être bien assuré que le thermomètre est stationnaire quand on lit son indication; les gros thermomètres, surtout ceux à esprit-de-vin, sont très longs à prendre la température.

Remarque.

861. A la rigueur, l'instrument ne donne que la température du point où il est placé. Si le corps que l'on considère a une certaine étendue, il faut répéter l'opération pour les divers points; mais, dans les cas ordinaires, et surtout par les liquides et les gaz on peut admettre que l'indication est vraie pour une distance assez grande.

Température de l'air.

862. Il y a ensuite des précautions particulières pour prendre la température des différents corps. Pour avoir celle de l'air, par exemple, il ne faut pas tenir le thermomètre à la main, ni le poser sur des corps qui pourraient lui transmettre une chaleur étrangère; on doit le suspendre librement et le plus loin possible des murailles. Il est évident que le thermomètre doit être à l'ombre puisque ce n'est pas l'effet des rayons solaires qu'on veut observer. Ce sera donc au nord du bâtiment qu'il faudra l'établir. On fixe même quelquefois deux larges disques de bois l'un au-dessus l'autre au-dessous du thermomètre, pour le préserver du rayonnement des objets circonvoisins et avoir plus exactement la température de la couche d'air où il est placé.

Température de l'eau à la surface.

863. Si on veut prendre la température de l'eau d'un lac, d'une rivière à la surface, il suffira de plonger un

thermomètre dans un seau plein de cette eau; car l'expérience prouve que la température d'une masse un peu considérable varie très lentement, en sorte qu'on a tout le temps de faire l'observation.

864. Pour prendre la température à une profondeur de 100, de 200^{m}, on enveloppe la boule du thermomètre d'une couche de cire d'un pouce ou deux d'épaisseur. Dans cet état, il faut quelquefois plus d'une heure pour que l'instrument prenne la température du lieu où il est placé; mais aussi quand il l'a prise, il la conserve très longtemps. Si donc après avoir lesté le thermomètre, on le descend à la profondeur voulue, et qu'après l'y avoir laissé quelques heures on le retire, il donnera exactement la température de la couche où il était plongé. A une profondeur déterminée.

§ II. *Températures remarquables.*

865. On prend ordinairement la température de l'homme en plaçant un thermomètre dans la bouche; et on trouve généralement 37° centigrades. Les différences de nourriture, de saison, de climat produisent seulement des variations de quelques dixièmes de degré. Quant à la température des parties superficielles, elle est moins élevée et de plus très variable. Des expériences récentes de M. Becquerel et Breschet ont montré qu'à égale profondeur, le tissu cellulaire était un peu moins chaud que le tissu musculaire. Pendant l'état fébrile, ils ont trouvé dans les muscles une élévation de plus de 3°. Température de l'homme.

866. La température des animaux est constante pour chaque espèce. Chez les oiseaux elle va jusqu'à 42°; celle des mammifères est à peu près celle de l'homme. Tous les autres animaux ont une température à peine supérieure à celle du milieu qu'ils habitent. Il en est de même des végétaux; quelques-uns seulement, les *arums*, par exemple, présentent une élévation remarquable de température dans les fleurs, au moment de la fécondation. Température des animaux. Température des végétaux.

867. La température du sol est extrêmement variable, suivant les heures de la journée, suivant la nature du terrain, Température de la terre à la surface.

son exposition, les mouvements de l'air, etc. Un fait bien remarquable, c'est que quand il n'y a pas de vent la température du sol est souvent très différente de celle de l'air; dans la journée, le sol est plus chaud que l'air; c'est le contraire pendant la nuit. Ainsi, pendant la nuit, le docteur *Wells* a vu des thermomètres placés sur l'herbe marquer quelquefois 7 à 8° de moins qu'à un ou 2 mètres de hauteur. Il y a aussi, quand l'air est calme, des différences très grandes entre des corps très voisins, surtout si le ciel est serein.

Température à différentes profondeurs.

868. On prend la température de la terre à différentes profondeurs avec des thermomètres qui restent enterrés mais dont les tiges sont assez longues pour qu'on puisse lire les indications. On a soin de tenir compte de l'inégalité des températures de la tige et du réservoir (937). Les thermomètres plus superficiels donnent les renseignements nécessaires pour faire cette correction sur les thermomètres plus profonds. Il résulte des expériences faites ainsi par *M. Quetelet* à Bruxelles, qu'à une profondeur d'un mètre, la température reste la même le jour et la nuit; qu'à 8^{m}, la différence entre l'été et l'hiver va tout au plus à 1°,5. Cela montre avec quelle lenteur la chaleur pénètre; aussi, à cette profondeur de 8^{m}, le maximum de température n'a lieu que vers le milieu de décembre. M. Poisson avait trouvé précédemment le même résultat d'après les observations faites à Paris.

Limite des variations diurnes.

Limite des variations annuelles.

Première couche de température invariable.

869. Dans nos climats, la différence des saisons devient insensible à une profondeur de 24^{m}. A Paris, dans les caves de l'Observatoire qui ont 28^{m}, la température reste constamment à 11°. Dans les régions équinoxiales, d'après les observations de *M. Boussingault*, il suffit d'enfoncer le thermomètre à un pied en terre, dans un lieu qui ne reçoive pas de soleil, pour qu'il marque le même degré à un ou deux dixièmes près pendant tout le cours de l'année.

Chaleur intérieure du globe.

870. A mesure qu'on descend au-dessous de la première couche de température invariable, on trouve que la chaleur augmente. Ce fait a été constaté dans un grand nombre de mines, tant en Europe qu'en Amérique; et il a été

surtout mis hors de doute par un mode d'observation dû à M. Arago. Un *puits artésien* est, comme on sait, un trou vertical ayant ordinairement plusieurs centaines de pieds de profondeur, et par lequel l'eau d'une nappe souterraine s'échappe à la surface du sol. Cette eau qui se renouvelle sans cesse doit bientôt arriver avec la température de la couche d'où elle provient; or, l'expérience prouve que cette température est en général d'autant plus élevée que le puits est plus profond. On a trouvé, terme moyen, 1° d'élévation pour une profondeur de 30^m; à Paris, c'est 38^m. Il y a, suivant les localités, des variations très fortes.

Eau des puits forés.

871. Il est assez vraisemblable d'après cela que les sources thermales doivent leur température aux couches profondes qu'elles traversent. Les expériences proposées par M. Arago sur les eaux d'Aix résoudront peut-être un jour la question. Il paraît qu'en Europe, la source thermale la plus chaude est celle de *Chaudes-Aigues*, en Auvergne; l'eau cependant est loin de bouillir, car elle marque seulement 80°. M. Boussingault en 1823 a trouvé 96°,6 à la source de las Trincheras (Venezuela). Cette source ne paraît avoir aucune connexion avec un volcan. Les sources qui ont quelque communications avec des volcans en activité peuvent fournir de l'eau tout-à-fait bouillante, comme on le voit pour les *Geysers* en Islande. Les volcans eux-mêmes ont été considérés comme des preuves de la chaleur centrale de la terre, mais on les regarde maintenant plutôt comme le résultat de quelque action chimique purement locale.

Sources thermales.

872. Suivant M. de Humboldt, la température de la mer ne dépasse nulle part 30°. Péron assure cependant avoir trouvé 31° près de l'équateur. Cette température maximum offre une très grande importance, ainsi que l'observe M. Arago, en ce qu'elle caractérise l'état actuel du globe, sous le rapport de la chaleur. Prise avec les précautions convenables et loin des continents, elle pourra décider par la suite si la terre s'échauffe et se refroidit.

Température des mers.

La température de la mer décroît très lentement à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur; c'est seulement vers le

50ᵉ degré que l'eau gèle quelquefois le long des côtes ; il faut arriver au 70ᵉ degré pour trouver des glaces flottantes ; c'est vers le 80ᵉ qu'on rencontre les glaces fixes. Les mers intérieures, à cause de leur plus petite masse, gèlent plus facilement, mais aussi s'échauffent plus pendant l'été, à latitude égale. Comme la température des mers varie moins suivant la saison que celle de l'air ou du sol, on conçoit que sur les côtes les hivers soient moins rigoureux, et les étés moins chauds que dans l'intérieur des terres ; les vents de mer égalisent la température ; cela explique comment on peut cultiver l'olivier sur les côtes de Bretagne.

Entre les tropiques et dans les zones tempérées, la mer est plus chaude à la surface que vers le fond ; c'est le contraire vers le pôle à partir du 70ᵉ parallèle. A de moyennes latitudes, une profondeur de 100 brasses donne un refroidissement de 7 à 8°. Près de l'équateur, Péron a trouvé 8°,5 à 390ᵐ, et 7 à 700ᵐ, la surface étant à 31°. A 20° de latitude, le capitaine Sabine a trouvé encore 7°,5 à plus de 2000ᵐ de profondeur, tandis qu'à la surface il y avait 28°.

Température des lacs.

873. Les lacs alimentés par les fontes de neige, comme ceux de la Suisse, ont vers leur fond une température qui diffère peu de 4° ; nous verrons à quoi tient ce phénomène remarquable. Dans les masses d'eau tranquille, le refroidissement dû à la profondeur est beaucoup plus rapide que dans la mer ; dans le lac de Genève, par une température de 21°,2 à la surface on trouve déjà une différence de 15° à 30 brasses.

Température des rivières.

874. Pendant l'hiver les rivières sont généralement moins froides au fond qu'à la surface ; c'est le contraire pendant l'été. Mais la différence s'efface quand la profondeur n'est pas très grande et que le cours est rapide ; ainsi, pour le Rhin, sur un fond de 15 pieds de profondeur, la température pendant l'hiver a été trouvée la même qu'à la surface.

Froid des hautes régions.

875. On sait depuis bien longtemps qu'il fait plus froid dans les lieux élevés. Voici quelques observations qui mettent bien ce fait en évidence ; elles ont été faites simultanément à Genève, à Fribourg et à l'hospice du Mont-Saint-

Bernard ; les hauteurs sont comptées au-dessus du niveau de la mer :

Genève 407m	Fribourg 635m	Saint-Bernard 2491m
30	27°,7	15°
20	18	7
10	8,2	— 1
— 10	—11,3	—17

876. A cause du froid qui règne dans les hautes régions, on voit, même dans les pays les plus chauds, le sommet de certaines montagnes rester constamment couvert de neige; la chaleur de l'été suffit à peine pour fondre ce qui est tombé pendant l'hiver. Pour trouver le point où les neiges subsistent ainsi même au milieu de l'été, il faut en général s'élever d'autant plus au-dessus du niveau de la mer qu'on est plus près de l'équateur comme on le voit par ce tableau :

Limite des neiges perpétuelles.

Zone torride	4,800m.
Caucase	3,300
Pyrénées	2,700
Alpes	2,000
Norwége	1,060
Laponie	950

Plus au nord les neiges perpétuelles se trouvent au niveau même de la mer. La température moyenne (883) de la limite n'est pas toujours 0° comme on pourrait d'abord le croire, elle varie suivant la latitude. C'est 1°,5 vers l'équateur, —6° en Norwége, et—3° environ dans les zones tempérées.

877. Le décroissement de température, quand on s'élève dans l'atmosphère, peut être exactement mesuré dans les ascensions aérostatiques. M. Gay-Lussac, lors du voyage dont nous avons parlé (621), a pris 20 indications thermométriques à différentes hauteurs, d'où il est résulté que l'abaissement était d'environ 1° pour 170 mètres. Il est à re-

Température à différentes hauteurs.

marquer que, dans les nuits calmes et sereines, la température de l'air, au lieu d'aller en diminuant à mesure qu'on s'éloigne du sol, présente au contraire une progression croissante, au moins jusqu'à une certaine hauteur. Ainsi, Pictet a vu qu'un thermomètre, élevé seulement de deux mètres et demi, marquait toute la nuit 2°,5 de moins qu'un instrument pareil suspendu à 17 mètres; le contraire avait lieu à midi. C'était deux heures environ après le lever du soleil et deux heures après son coucher que les deux instruments étaient d'accord.

Température des espaces planétaires.

878. D'après diverses considérations qui offraient assez de probabilité, Fourier avait assigné —60° pour la température qui règne au-delà de l'atmosphère; mais M. Poisson a été conduit à un résultat différent. Il pense que l'espace dans lequel se meut actuellement la terre est tout au plus à 13° au-dessous de zéro. Cette température, qui résulte du rayonnement des divers soleils dont l'univers se compose, doit d'ailleurs varier d'un point à l'autre; de sorte que notre système planétaire, qui selon toute apparence est emporté d'un mouvement général de translation, a pu ou pourra passer par des points d'une température différente.

Températures extrêmes sur le globe.

879. C'est dans l'intérieur de l'Afrique qu'on observe les plus fortes chaleurs. La température de l'air y dépasse quelquefois 40° à l'ombre. On a même vu le thermomètre à 53° pendant le *Sirocco;* mais on attribue cette température excessive à la présence d'une poussière sablonneuse dans l'air. Le capitaine Parry, en février 1819, a vu le thermomètre à 46° au-dessous de zéro, dans l'île Melville, dont la latitude est de 74°; le mercure y reste gelé cinq mois de l'année. Depuis, le capitaine Ross, dans son voyage aux régions polaires, a observé un abaissement de —56°.

Températures extrêmes à Paris.

880. A Paris, le plus grand froid a été de 23°, 5 (25 janvier 1795); la plus forte chaleur de 38° 4 (8 juillet 1793); le thermomètre était cependant à l'ombre. Dans nos climats, c'est généralement vers le milieu de janvier et le milieu de juillet que s'observent les plus grands froids et les plus fortes chaleurs. La température la plus élevée de la journée a lieu vers deux heures de l'après-midi en été, et

vers trois heures en hiver; la plus basse s'observe un peu avant le lever du soleil.

881. Si dans une journée on observait, par exemple, tous les quarts d'heure le thermomètre qui donne la température de l'air (862), et si, après avoir additionné ces 96 observations, on prenait la 96e partie de la somme, on aurait la température *moyenne* de la journée. On trouve plus facilement cette température moyenne et avec beaucoup d'approximation (du moins dans les climats qui ne sont pas trop au nord), en prenant la demi-somme des températures extrêmes observées aux heures convenables, ou données par le thermomètre à maxima et à minima. On peut encore prendre pour température moyenne celle de huit heures et demie du matin; car l'expérience prouve qu'elle diffère très peu en général de la véritable moyenne.

Température moyenne d'un jour.

882. En additionnant toutes les températures moyennes du mois et divisant par le nombre de jours, on a la température moyenne du mois, et enfin la température moyenne de l'année en divisant par 12 la somme des températures moyennes des mois. L'observation montre que la température moyenne de l'année diffère peu de celle des premiers jours d'avril ou d'octobre, ce qui fournit des procédés plus expéditifs pour sa détermination.

Température d'un mois, d'une année.

883. On appelle température moyenne d'un lieu, ou température *climatérique*, la température moyenne de l'air résultant des observations de plusieurs années; il en faut généralement dix ou douze pour que les variations accidentelles se compensent. A Paris, d'après 29 années d'observations relevées par M. Bouvard, la température moyenne est de 10°,822. En général, c'est à peu près celle de la première couche de température invariable (869), ce qui donne encore un moyen très prompt de connaître la température moyenne d'un lieu où l'on ne peut séjourner. L'eau des puits d'une profondeur médiocre la donne aussi avec assez d'exactitude. Dans les tropiques, la couche de température invariable est si voisine du sol que l'observation est très facile. Un fait bien remarquable signalé par M. Poisson, c'est que la température moyenne du sol pendant l'année entière,

Température moyenne d'un lieu.

diffère très peu de la moyenne prise dans l'air. Ce résultat est vrai dans la zone torride et dans les zones tempérées, mais non pas à ce qu'il paraît dans les climats froids; car M. Rudberg, à Stockholm, a trouvé la température moyenne du sol plus élevée que celle de l'air; la différence est d'un degré.

Lignes isothermes.

884. En marquant sur un globe terrestre tous les points dont la température moyenne est de 10°,8 comme à Paris, on trouve une ligne qui n'est pas exactement parallèle à l'équateur, et qu'on appelle ligne *isotherme* de 10° 8. M. de Humboldt à qui l'on doit l'idée des lignes isothermes a tracé de mêmes celles de 0°, de 10°, de 20°, etc. Celle de 27° 5′ coïncide avec l'équateur; les autres, au lieu d'être parallèles, se relèvent vers le nord en approchant du méridien qui passe par le milieu de l'Afrique; tandis qu'elles s'abaissent vers le méridien qui passe par le milieu de l'Océan Pacifique pour se relever encore près des côtes occidentales de l'Amérique. On voit par là que la présence des terres augmente la chaleur; aussi, à latitude égale, l'hémisphère austral est-il plus froid que le nôtre. Dans la nouvelle Géorgie et dans les îles Sandwich par 54 et 58° les neiges sont déjà perpétuelles au niveau de la mer.

Lignes isothères, isochimènes.

885. On pourrait se faire une fausse idée de la température d'un lieu si on ne considérait que la température moyenne de l'année entière; car on conçoit qu'une égale quantité de chaleur annuelle puisse être très inégalement répartie entre les diverses saisons. De là l'idée des lignes *isothères*, ou d'égal été, et des lignes *isochimènes*, ou d'égal hiver. Ces lignes s'écartent encore plus des parallèles géographiques que les lignes isothermes; car, par exemple, l'été est tout aussi chaud à Moscou qu'à Nantes, quoique Moscou soit de 11° plus au nord.

La différence de l'été à l'hiver est si petite pour certains lieux, que la température y est presque constante. Ainsi, à Funchal (Madère), la température moyenne de l'été est de 24°, et celle de l'hiver est encore de 17, 8°. A Paris, au contraire, du mois le plus chaud au mois le plus froid, la différence va jusqu'à 15° 8ᵉ à Londres, c'est 16° 2; de sorte

que, pour ces deux points, le climat est très variable. Il l'est encore plus à New-Yorck et à Pékin, où les différences dépassent 30°, comme on le voit par le tableau suivant :

	TEMPÉRATURE MOYENNE		
	de l'année,	du mois le plus chaud,	le plus froid.
New-Yorck. . . .	12°, 1	27°, 1	3°, 7
Pékin.	12, 7	29, 1	4, 1

886. Voici, pour quelques lieux remarquables, un tableau des températures moyennes donné par M. de Humboldt. Table des températures moyennes.

Lieux.	Latitude.		TEMPÉRATURE MOYENNE de l'année.	de l'hiver.	de l'été.
Cap Nord.	71°	. . .	0°, 0	4, 6	6, 3
Pétersbourg.	59	56. . .	3, 8	8, 3	16, 7
Moscou.	55	45. . .	4, 6	11, 8	19, 5
Stockholm.	59	20. . .	5, 7	3, 6	16, 6
Copenhague.	55	41. . .	7, 6	0, 7	17, 0
Édimbourg.	55	57. . .	8, 8	3, 7	14, 6
Dublin.	51	25. . .	9, 5	4, 0	15, 3
Genève.	46	12. . .	9, 6	1, 5	18, 3
Londres.	51	30. . .	10, 2	4, 2	17, 3
Vienne.	48	12. . .	10, 3	0, 4	20, 7
Paris.	48	50. . .	10, 8	3, 7	18, 1
Amsterdam.	52	22. . .	10, 9	2, 7	18, 8
Bruxelles.	50	51. . .	11 -	2, 6	19, 0
Milan.	45	28. . .	13, 2	2, 4	22, 8
Rome.	41	53. . .	15, 8	7, 7	24, 0
Alger.	36	48. . .	21, 1	16, 4	26, 8
Le Caire.	30	2. . .	22, 4	14, 7	29, 5
La Havane.	23	10. . .	25, 6	21, 8	28, 5
Cumana.	10	27. . .	27, 7	26, 8	28, 7

887. D'après la marche des températures, à mesure qu'on s'approche du pôle, M. Arago a trouvé qu'au pôle même la température moyenne devait être d'environ — 25°. Température moyenne du pôle.

Température moyenne de la surface de la terre.

888. Il est possible qu'à une époque très reculée la température de la surface de la terre ait été beaucoup plus élevée qu'elle ne l'est aujourd'hui; mais les recherches de M. Arago ont montré que, depuis 2,000 ans environ, il n'y avait point eu de changement notable. M. Libri, en discutant les premières observations thermométriques faites par les académiciens *del Cimento*, est parvenu à établir que la température moyenne de la Toscane n'avait pas varié d'un degré depuis 200 ans; ce qui montre que les causes accidentelles, comme le déboisement, ont eu beaucoup moins d'influence qu'on ne le croit généralement.

Température moyenne du globe.

889. Quant à la température moyenne de la masse du globe, on peut affirmer qu'elle n'a pas diminué d'un centième de degré depuis 2,500 ans; en effet, d'après le calcul de Laplace, s'il avait eu un pareil refroidissement, le rayon de la terre se serait raccourci d'un dix-millionième, et par suite la vitesse de rotation eût augmenté d'un cinquantième de seconde; or, nous avons déjà dit que la durée du jour n'avait pas varié de cette quantité (47).

CHAPITRE II.

CHANGEMENTS DE VOLUME.

§ Ier. *Dilatations.*

Dilatation des gaz et des liquides.

890. En général, les corps se dilatent par la chaleur et se contractent par le froid; les gaz surtout éprouvent des variations très considérables dans leur volume; viennent ensuite les liquides, puis les solides. On peut constater les dilatations de l'air avec le thermomètre de Drebbel (837); quant aux liquides, il suffit d'en faire une espèce de thermomètre. On voit alors leur volume varier continuellement avec la température, ainsi que nous l'avons constaté déjà pour le mercure et pour l'alcool.

891. Le *pyromètre métallique* montre très bien la dilatation en longueur qu'éprouvent les corps solides. Une tige de cuivre AB est fixée solidement en B ; son extrémité A peut pousser le petit bras d'un levier coudé dont le grand bras OH forme une aiguille qu'on voit marcher dès qu'on allume les lampes placées sous la tige. Quand on les éteint, l'aiguille revient peu à peu à sa place, ce qui montre que la barre reprend sa longueur primitive; elle la reprend bien plus si on la refroidit, par exemple, avec de l'eau. En faisant la même expérience sur différents métaux, on reconnaît que le zinc est le plus dilatable ; vient ensuite l'argent, le cuivre, l'or, le fer, et enfin le platine, dont l'allongement n'est pas même le tiers de celui du zinc.

Dilatation linéaire des solides.

Pyromètre métallique.

Fig. 296.

892. Pour montrer que la dilatation se fait en tous sens, on a une petite sphère, de cuivre par exemple, qui passe très juste dans un anneau quand elle est froide, et qui ne passe plus quand elle est chauffée.

Dilatation cubique.

Anneau de Sgravesande.

893. On reconnaît par cette expérience et quelques autres du même genre que les corps homogènes ne changent pas de forme en se dilatant; une sphère reste une sphère, un cube reste un cube ; de sorte que le même corps, à deux températures différentes, contitue deux polyèdres semblables dont les dimensions seules ont changé.

Les corps homogènes ne se déforment point en se dilatant.

894. Quant aux corps hétérogènes, la dilatation différente des différentes parties entraîne généralement un changement de forme. Comme application de ce fait, on peut citer le thermomètre de *Bréguet*, qui est une espèce de ruban métallique enroulé en hélice, formé de 3 lames très minces de platine, d'or et d'argent intimement unies; l'argent se dilatant plus que le platine, l'hélice se tord ou se détord par les changements de température. Elle est fixée par un bout, et de l'autre elle porte une aiguille qui marque sur un cadran les changements qu'elle éprouve. L'or, qui a une dilatation intermédiaire, prévient les déchirures qui se feraient si on n'employait que le platine et l'argent. Pour graduer l'instrument, on le met dans une étuve dont on fait varier graduellement la température, et on marque les positions de l'aiguille correspondantes aux indications d'un bon

Changement de forme dans les corps hétérogènes.

Thermomètre de Bréguet.

Fig. 297.

thermométre à mercure. Le thermomètre de Bréguet qui se réduit en quelque sorte à une surface, a l'avantage d'accuser instantanément les changements de température. On lui donne quelquefois la forme d'une montre en le réduisant à une spirale plate ou à une portion de courbe; mais alors on agrandit les mouvements de l'aiguille par un petit engrenage. Le thermomètre de Régnier est encore fondé sur le changement de forme occasionné par la chaleur dans un système formé de deux métaux.

Thermomètre de Régnier.

Dilatation des cristaux.

895. Les substances cristallisées n'ont pas toujours une même dilatation en tout sens; ainsi M. Mitscherlich a constaté que les cristaux de spath d'Islande changeaient de forme par la chaleur; ils s'allongent proportionnellement plus dans le sens de l'axe que perpendiculairement à cette direction.

Dilatation des vases démontrée par l'expérience.

896. Quand on dilate la matière qui compose un vase, on ne voit pas d'abord si la cavité doit s'agrandir ou diminuer; dans la réalité elle s'agrandit, et on le prouve en montrant que la petite sphère dilatée (892) peut passer si on a soin d'échauffer l'anneau. Dans les laboratoires de chimie, quand on a de la peine à enlever un bouchon de cristal, on échauffe le goulot, soit avec des charbons, soit par le frottement avec une ficelle; le bouchon sort ensuite sans peine, pourvu que la chaleur n'ait pas pénétré jusqu'à lui. Voici encore une expérience qui prouve bien que la capacité d'un vase augmente avec la chaleur. On prend un petit ballon de verre qu'on remplit d'eau; à son col on ajuste un bouchon traversé par un tube étroit en faisant en sorte que le liquide s'élève à une certaine hauteur dans le tube; on a ainsi une espèce de gros thermomètre. Si on le plonge brusquement dans l'eau chaude, le niveau baisse tout à coup dans le tube, parce que le ballon se dilate et loge ainsi une plus grande quantité de liquide. Ensuite la chaleur passant dans l'eau, celle-ci se dilate à son tour, et comme elle se dilate plus que le verre, le niveau dans le tube s'élève plus qu'il n'avait baissé. On a des phénomènes inverses en plongeant l'appareil dans de l'eau froide, c'est-à-dire que le premier effet est un abaissement. On est

étonné en faisant ces expériences de la rapidité des changements.

897. On conçoit aisément que la capacité d'un vase doive s'agrandir quand les parois se dilatent, en observant que ces parois peuvent s'assimiler à une voûte décomposable en voussoirs. Ceux-ci se dilatent dans toutes les dimensions; or, dès que les voussoirs deviennent plus grands, la cavité qu'ils comprennent devient nécessairement plus grande.

Dilatation des vases démontrée par le raisonnement.

898. On peut encore s'assurer par le raisonnement que la capacité d'un vase doit s'agrandir *précisément comme le volume qui la remplirait*, bien entendu que ce volume est supposé de la même matière que le vase. En effet, concevons deux plans AB, CD parallèles et tangents à une cavité de forme quelconque creusée dans un corps solide. Par la dilatation des parties solides AC, BD, ces deux plans s'écarteront précisément comme s'il n'y avait pas de cavité; donc pour celle-ci la dimension perpendiculaire aux plans s'agrandira comme s'il s'agissait d'un corps solide, et il en sera de même de toutes les autres dimensions, puisque la direction des plans est quelconque.

Une cavité se dilate comme le volume qui la remplirait.

Fig. 298.

899. Le verre, les pierres, la brique, etc., se dilatent moins en général que les métaux; cependant leur dilatation devient sensible dans bien des circonstances. Nous avons déjà constaté celle du verre (896). Bougner, pendant son séjour au Pérou, observa que la chaleur du soleil faisait éprouver à un pavé de briques qui était dans la cour de sa maison une dilatation d'un tiers de ligne pour une largeur de 11 pieds. On sait que les poteries se fêlent quand on les chauffe brusquement ou inégalement; c'est évidemment parce que les dilatations ne peuvent pas se faire alors d'une manière uniforme; aussi un verre épais casse-t-il bien plus facilement au feu qu'un verre mince.

Dilatation du verre, des pierres, etc.

M. Vicat a fait des observations très curieuses sur les changements que la température occasionne au pont de *Souillac*, sur la Dordogne. Ce pont est dirigé de l'est à l'ouest, de sorte qu'il a une face au nord et l'autre au midi. C'est sur celle-ci que les effets sont surtout marqués : ainsi,

dans les grands froids certains joints des pierres de la voûte s'entr'ouvrent, puis ils se resserrent quand il fait chaud.

Les pierres humides ou sèches se dilatent de même.

900. Un fait remarquable constaté par M. Destigny, c'est qu'une pierre humide ne se dilate pas plus qu'une pierre sèche; c'est du moins ce qu'il a trouvé pour la pierre de *Saint-Leu*, en ne dépassant pas 30° C. L'échantillon qui n'avait guère que 3 décimètres cubes avait été plongé toute une nuit dans l'eau et en avait absorbé (sans changer de dimension) plus de 1,100 grammes, c'est-à-dire plus du tiers de son volume.

Dilatation des substances organiques.

901. On a peu étudié la dilatation des substances organisées, qui d'ailleurs perdent de l'eau ou même se décomposent quand on vient à les chauffer. On sait que le bois, qui change si sensiblement de volume par l'humidité, n'éprouve par la chaleur qu'une dilatation presque nulle.

Substances qui se contractent par la chaleur.

902. Certaines substances, quoiqu'elles ne s'altèrent pas, se contractent au lieu de se dilater quand on les échauffe. On peut citer le butyrate de chaux. Nous avons vu aussi que l'argile (856) soumise à une haute température diminuait de volume sans rien perdre de son poids. Ce *retrait* de l'argile paraît dû à un commencement de fusion, d'où résulte un tassement plus exact des molécules. Nous savons que la diminution de volume persiste, de sorte que nous avons là un phénomène d'un genre particulier bien plutôt qu'une exception réelle. Mais l'eau en offre une véritable :

Marche d'un thermomètre à eau.

Fig. 299

Maximum de densité de l'eau.

Supposons un thermomètre rempli d'eau pure; si le niveau est en M à la température de zéro, il descendra à mesure qu'on échauffera le liquide; à 4° il sera le plus bas possible; l'eau sera alors à son maximum de densité; à partir de ce point il y aura toujours dilatation tant qu'on élèvera la température. On voit d'après cela qu'un thermomètre à eau donnerait des indications ambiguës entre 0 et 8°; on serait obligé par exemple de l'échauffer un peu pour voir s'il marque 1° ou 7°, 2° ou 6°, etc. D'après les expériences de M. Erman fils, l'eau de mer n'a pas de maximum de densité au-dessus de son point de congélation.

Phénomènes qui résultent des dilatations.

903. Les changements de volume occasionnés par la chaleur donnent lieu à un grand nombre de phénomènes re-

marquables. Déjà nous avons vu que les montgolfières s'élevaient parce qu'elles renfermaient de l'air chaud, plus léger que l'air extérieur. Le tirage des cheminées, les courants d'air et presque tous les mouvements de l'atmosphère sont dus en définitive à la diminution du poids spécifique de l'air dilaté par la chaleur.

Courants dans les gaz.

904. On peut observer les courants que des dilatations inégales occasionnent dans un liquide, en exposant au soleil un vase de verre un peu profond, contenant de l'eau où l'on a mis quelques parcelles de poussière. Il se manifeste bientôt des courants ascendants le long de la partie échauffée, et descendants de l'autre côté. L'eau sur le feu présente ces courants d'une manière encore plus marquée : les particules du fond montent dès que leur dilatation les a rendues plus légères; d'autres descendent pour les remplacer. Ordinairement le courant descendant est au centre de la masse, parce que ce sont les parties voisines des parois qui s'échauffent de préférence.

Courants dans les liquides.

Les phénomènes se reproduisent en sens inverse quand on refroidit l'eau, du moins tant qu'on n'a pas atteint 4°; car alors, si le vase est posé sur de la glace, il y a des courants ascendants, comme quand il était sur le feu.

905. On observe dans les glaciers de la Suisse des trous très étroits et très profonds, remplis d'eau, qui s'agrandissent en profondeur bien plutôt qu'en largeur. Il est facile de concevoir par quel mécanisme ils se creusent : s'il y a un peu d'eau dans une cavité superficielle, cette eau doit marquer environ 0° dans la partie qui touche à la glace; mais à la surface, où elle reçoit les rayons du soleil, elle peut s'échauffer. Or, les molécules qui s'échauffent ainsi deviennent plus lourdes; elles doivent donc descendre, et leur chaleur, transmise ainsi au fond, y détermine peu à peu la fusion de la glace.

Puits des glaciers.

906. On conçoit maintenant comment certains lacs ont vers le fond une température qui diffère peu de 4°, puisque, dans une masse d'eau tranquille, c'est vers le fond que doivent se trouver les particules les plus lourdes.

Température des lacs.

907. Les dilatations des métaux sont tellement considé-

Dilatations des métaux

dans les constructions.

sidérables, et surtout se font avec tant de force, qu'on est obligé d'en tenir compte dans les constructions. Ainsi on a eu soin de laisser de petits intervalles entre les pièces de bronze qui forment l'hélice de la colonne Napoléon. Cette hélice a 813 pieds de développement, et si toutes les dilatations s'ajoutaient il y aurait, de l'hiver à l'été, des différences de 8 à 9 pouces dans la longueur. Quand on établit des tuyaux de conduite, on les ajuste de manière qu'ils s'engagent un peu les uns dans les autres, laissant ainsi du jeu pour la dilatation. On a soin de ne pas clouer en une seule pièce toutes les parties d'une grande toiture métallique. Lorsqu'on établit une grille on laisse le jeu convenable; sans quoi une porte qui fermerait bien pendant une saison ne pourrait plus fermer pendant une autre.

Marche irrégulière des horloges.

908. Mais c'est surtout dans les instruments de précision que les effets des dilatations se font sentir. Quand il fait chaud, le pendule qui règle une horloge s'allonge, et l'horloge se met à retarder; les montres éprouvent des effets analogues. Si on fait du feu dans une chambre, on voit le baromètre monter, sans cependant que la pression atmosphérique devienne plus forte; c'est seulement que la chaleur dilate le mercure, et qu'il faut une colonne plus haute de ce liquide, devenu plus léger, pour faire équilibre à la même pression. Il est vrai que si l'échelle qui mesure la colonne s'allongeait précisément comme elle, on pourrait encore lire l'indication exacte; mais il n'en est pas ainsi, et la dilatation toute différente de l'échelle amène une nouvelle cause d'erreur. On conçoit que les mesures de longueur, de capacité sont dans un état continuel de variation, et qu'il en est de même des choses que l'on mesure. Ainsi un hectolitre d'esprit-de-vin a notablement plus de valeur en hiver qu'en été, et on en tient compte aux barrières; cependant, en général, on peut supposer les mesures invariables; c'est seulement dans les recherches scientifiques que leurs variations ont de l'importance, et nous verrons bientôt comment on y a égard.

Erreur sur la hauteur barométrique.

Sur les mesures de longueur, de capacité.

Force de dilatation dans les gaz.

909. La force de dilatation due à la chaleur est bien ma-

nifeste dans les gaz et les vapeurs, puisque c'est elle qui produit les explosions des armes à feu et qui fait marcher les machines à vapeur. Dans l'air on peut la mettre aisément en évidence, en échauffant un peu le thermomètre de *Drebbel* (837); il est clair que la force élastique augmente, puisque le niveau descend. Pour avoir une idée de cette force, on n'a qu'à plonger dans de l'eau chaude le tube de *Mariotte* (508). Si l'on a soin d'ajouter du mercure pour que le volume reste le même, on trouvera que la force élastique est considérablement augmentée, car la colonne soutenue sera beaucoup plus haute. Nous verrons par la mesure des dilatations quel est l'accroissement de force qui résulte d'une élévation donnée de température. Cette force est assez considérable pour qu'il y ait quelques chances de succès à remplacer la vapeur dans les machines par de l'air chaud préalablement comprimé (940).

Force de dilatation dans les liquides.

910. Les liquides acquièrent par la chaleur une force de dilatation telle, qu'il arrive un moment où les vases ne peuvent plus résister. Quand le mercure, dans un thermomètre, est monté jusqu'au haut du tube, le plus petit accroissement de chaleur fait casser l'instrument, et il en serait de même d'un vase beaucoup plus solide. La force de dilatation des liquides, bien qu'elle soit si grande, est restée jusqu'à présent sans emploi, parce que les changements de volume sont fort petits; mais peut-être l'acide carbonique, qui a une énorme dilatation, pourra-t-il fournir un nouveau moteur.

Force de dilatation dans les solides.

911. Certaines dégradations observées dans les constructions montrent avec quelle force les solides se dilatent par la chaleur : souvent des barres de fer scellées dans des pierres les écartent en se dilatant, ou les arrachent en se contractant. Voici d'ailleurs une expérience qui fait voir combien est grande la force qu'on développe dans les métaux par les changements de température. Il y avait au Conservatoire des Arts et Métiers, à Paris, une galerie dont les murs chargés du poids des étages supérieurs s'étaient déviés de leur aplomb, et tendaient à se renverser au dehors. Molard, directeur du Conservatoire, fit établir d'espace en espace

des barres de fer qui traversaient la galerie près du plafond, sortant de chaque côté par des trous pratiqués dans les murs. Les bouts de ces barres étaient taraudés, et recevaient en dehors de larges écrous serrés avec force contre la muraille. On conçoit que cette disposition limitait déjà l'écartement. En chauffant les barres, on les força de s'allonger, ce qui permit de resserrer les écrous. Par le refroidissement le fer se contracta, malgré la résistance énorme qu'il avait à vaincre; de sorte que les murs se redressèrent d'une petite quantité. Chauffant ensuite les barres de deux en deux, on put resserrer encore les écrous, tandis que les barres froides maintenaient le rapprochement obtenu; et en continuant cette manœuvre, on parvint à remettre les murailles parfaitement dans leur aplomb.

Cette expérience montre directement la force de contraction; mais la force de dilatation est au moins égale, puisqu'elle est opposée et produit son effet.

Cause des dilatations.

912. La dilatation d'un corps ne vient pas de ce que la chaleur en s'y introduisant le gonfle, comme l'eau fait dans une éponge. Cette comparaison grossière n'expliquerait nullement les faits; on ne verrait pas pourquoi un litre d'eau se loge dans une pierre sans faire varier son volume, tandis qu'un peu de chaleur y produit une dilatation sensible. Le poids d'ailleurs ne change pas, de sorte qu'on n'a aucun droit d'assimiler ainsi la chaleur à un corps matériel et pesant. Pour se tenir dans le vrai, il faut reconnaître que la dilatation est due à un accroissement dans la force répulsive, que nous avons admise entre les molécules du corps.

Répulsion entre les corps contigus.

913. Cet accroissement de force répulsive ne se manifeste pas seulement entre les molécules d'un même corps; on l'observe aussi entre deux corps contigus. Ainsi, en échauffant l'appareil dont on se sert en optique pour le phénomène des anneaux colorés, et qui consiste en deux verres posés l'un sur l'autre, *Powel* a constaté un écartement très notable. *Addams* a obtenu aussi des signes bien évidents de répulsion entre les surfaces échauffées et certains corps pulvérulents. Par exemple, en mettant un peu de silice dans une capsule de platine au-dessus d'une lampe à

alcool, il a vu que la poudre acquérait en quelques secondes une mobilité extrême; le frottement était si faible que souvent la silice ne bougeait pas, quoiqu'on fît glisser le vase au-dessous. On a des phénomènes semblables avec la magnésie, le peroxide de manganèse, etc.; mais non pas avec l'alumine ni avec la litharge, du moins à la chaleur que peut donner la lampe. Ces exceptions s'accordent avec ce fait général, que les actions moléculaires dépendent de la nature du corps. M. Thilorier a observé une répulsion analogue entre l'acide carbonique solidifié par le froid et des surfaces prises à la température ordinaire. On sait depuis longtemps qu'une goutte d'eau roule sur une pelle de fer rouge sans la mouiller; ce qui montre combien la chaleur diminue l'attraction entre le métal et l'eau, qui se comporte alors comme le mercure sur du verre. A cause des variations de température, on conçoit que la répulsion doit être variable; aussi, dans un creuset chauffé au rouge une goutte d'eau présente des vibrations qui la font paraître dentelée sur les bords, les dentelures étant toujours au nombre pair comme les parties vibrantes des disques, ainsi que l'a observé M. A. Laurent. Dans tous les cas, le défaut de contact fait que l'évaporation est bien plus lente que si le vase était moins chaud. Nous citerons encore une expérience bien remarquable de *Trévelyan*, pour montrer la répulsion entre des métaux échauffés. Si sur un morceau de plomb on pose une masse de cuivre fortement échauffée, et d'une forme telle qu'elle ne touche que par un point, le plomb, au point de contact, s'échauffe, et la masse de cuivre se trouve soulevée d'une petite quantité. Pendant ce temps, la chaleur se répartit dans le plomb; de sorte que la répulsion diminue et que la masse se rapproche pour être repoussée de nouveau, et ainsi de suite. Ces alternatives se succèdent si rapidement, qu'il se produit un son ordinairement assez grave, mais qu'on peut rendre plus aigu en appuyant sur la masse de cuivre, ce qui limite les excursions. C'est même par le son qu'on a été averti du mouvement qui a lieu dans cette expérience.

§ II. *Mesure des dilatations.*

Difficulté des mesures.

914. Après avoir constaté les changements de volume produits par la chaleur, nous allons voir comment on les mesure. Remarquons d'abord que cette opération est fort délicate quand on veut y mettre de la précision, parce qu'il s'agit en général de quantités fort petites. Ainsi une barre de fer de 4 pieds, prise à la température de la glace, ne s'allonge pas même d'une ligne quand on la plonge dans l'eau bouillante. De plus, les appareils dont on se sert éprouvent souvent eux-mêmes des changements dont on est obligé de tenir compte ; par exemple, si, pour mesurer la dilatation du mercure, je l'enferme dans un vase de verre, il faut que je tienne compte de la dilatation du vase, ou que je trouve le moyen d'éluder son effet.

Procédés de MM. Dulong et Petit.

915. Parmi les divers procédés imaginés pour mesurer les dilatations, nous indiquerons seulement ceux de MM. Dulong et Petit, parce qu'ils sont les plus parfaits.

Dilatation absolue du mercure. Fig. 300.

Soit ABCD un tube recourbé rempli de mercure ; on maintient la branche AB à 0° en l'entourant de glace fondante, et on porte CD à différentes températures en chauffant un vase rempli d'huile que cette branche traverse. Supposons qu'à 100° on trouve 56 centimètres pour la hauteur du mercure d'un côté, et seulement 55 de l'autre ; on peut conclure que de zéro à 100° le mercure se dilate de $\frac{1}{55}$; c'est-à-dire qu'un litre de mercure pris à zéro deviendrait à 100° un litre plus $\frac{1}{55}$ de litre.

En effet, le mercure chaud est ici un liquide plus léger ; et l'expérience prouve que, pour l'équilibre, les colonnes doivent être :: 56 : 55 ; mais ce rapport est indépendant de la forme du tube ; il serait encore le même avec un tube cylindrique et invariable ; or dans ce cas il est évident que la quantité dont le mercure s'élève représente la dilatation de toute la masse qui compose la colonne.

Remarque.

916. On ne voit pas précisément de quel point les hauteurs doivent être comptées dans cette expérience. Pour éluder la difficulté, on a choisi un tube de communication

très étroit et on a pris les hauteurs à partir de son axe qui était parfaitement horizontal. D'ailleurs, on s'est assuré que des différences de plusieurs dixièmes de millimètre dans la hauteur AB n'altéraient pas sensiblement le résultat.

917. Quand le mercure est contenu dans un vase ordinaire, sa dilatation paraît moindre parce que celle du vase en dissimule une partie. Pour avoir cette dilatation apparente dans le verre, on met du mercure dans un tube, de manière qu'il soit entièrement plein à 0°, supposons qu'en chauffant à 100° il en soit sorti un gramme, et que le reste pèse 65 gr., il est clair que quand tout est refroidi, le vide représente la dilatation des 65 gr.; mais ce vide logeait un gramme de mercure, ou la 65e partie du volume de ce qui reste, donc la dilatation pour l'unité du volume est $\frac{1}{65}$. Dilatation apparente dans le verre.

918. Le tube, pendant l'expérience, est plongé dans une auge remplie d'abord de glace pilée et fondante; on a ainsi la température 0°. Cette auge est placée sur un fourneau, de sorte qu'on peut porter l'eau jusqu'à l'ébullition. Il faut que le tube soit entièrement plongé; la pointe, qui d'ailleurs est très fine, sort seule du liquide. Manière de chauffer. Fig. 301.

919. Une cavité creusée dans du verre se dilate précisément comme le verre qui la remplirait (898); d'après cela imaginons une cavité d'un centimètre cube pleine de mercure à 0°. Nous savons par l'expérience précédente que si on porte la température à 100°, on trouvera $\frac{1}{65}$ pour la dilatation du mercure. Mais, sans la dilatation du verre, on aurait $\frac{1}{55}$; donc $\frac{1}{55}-\frac{1}{65}$ est la quantité dont se dilate un centimètre cube de verre en passant de 0 à 100°. Cette différence est $\frac{1}{387}$, parce que les véritables dilatations du mercure sont $\frac{10}{555}$ et $\frac{10}{648}$; nombres que nous avions simplifiés pour faciliter le raisonnement. Dilatation du verre.

920. Pour avoir la dilatation apparente d'un liquide, on opère comme avec le mercure; on trouve ainsi $\frac{1}{23}$ pour l'eau, $\frac{1}{9}$ pour l'alcool, etc. Si on veut la dilatation réelle, il faut ajouter $\frac{1}{387}$. Dilatation des liquides.

921. Pour les gaz, il y a quelques précautions particulières. Supposons le tube rempli d'air parfaitement sec à 0°; on Dilatation de l'air. Fig. 302.

le chauffera jusqu'à 100°; et alors, faisant plonger l'orifice dans du mercure, il se fera une absorption à mesure que l'appareil se refroidira. On déterminera exactement le poids du mercure absorbé après avoir eu soin de ramener l'appareil à 0° avec de la glace. On déterminera aussi le poids du métal qui, à cette même température, peut remplir le tube en totalité. Soient, par exemple, 374gr,742 et 1374gr,742, ces deux poids : la différence 1000 pourra représenter le volume à zéro d'une masse d'air capable de remplir le tube à 100°; de sorte que 374,742 sera la dilatation apparente (917) pour un volume égal à 1000. Pour un volume égal à l'unité, ce serait donc 0,374742; ajoutant $\frac{1}{387}$ ou 0,000258, qui est la dilatation du verre pour l'unité du volume, on a enfin 0,375 pour la dilatation réelle de l'air. Nous avons supposé que la pression atmosphérique ne variait pas pendant l'expérience; autrement le changement de volume ne serait pas entièrement dû au changement de température. Du reste, la loi de Mariotte permettrait de faire la correction.

Manière de remplir le tube d'air sec.

922. Nous avons dit qu'avant tout il était indispensable de remplir le tube d'air parfaitement sec; pour cela, après l'avoir effilé par les deux bouts, on le met en communication, d'une part avec la machine pneumatique, et de l'autre avec un tube de 6 à 7 décimétres rempli de fragments de chlorure de calcium. Quand on fait le vide, l'air afflue à travers le chlorure, qui lui enlève toute son humidité; il suffit d'entretenir ainsi le courant une ou deux minutes, pour dessécher parfaitement l'intérieur du tube. On ferme ensuite une extrémité, et on courbe l'autre comme dans la fig. 300.

Dilatation des autres gaz. Loi de Gay-Lussac.

Fig. 303.

923. On constate aisément que les autres gaz se dilatent exactement comme l'air, sans répéter pour chacun l'expérience précédente. Il suffit de faire passer un volume déterminé du gaz dans un tube gradué sur le mercure, et de mettre à côté un tube semblable contenant un pareil volume d'air. Plaçant l'appareil dans une étuve, on voit qu'en faisant varier la température les volumes restent constamment égaux.

924. MM. Dulong et Petit ont mesuré la dilatation du fer, en enfermant une tige de ce métal dans un tube rempli de mercure à zéro, ce qui donnait un appareil analogue à celui de la fig. 300. Chauffant à 100°, puis laissant refroidir, ils obtinrent, à cause du mercure sorti, un vide qui, avec la dilatation du verre, pouvait contenir les dilatations réunies du fer et du mercure restants. Par le poids du mercure sorti, et par son poids spécifique *à zéro*, il est facile de calculer le volume du vide à cette même température (136) : supposons-le de deux dixièmes de centimètre cube; soit de même 30cb, et 11cb, les volumes du fer et du mercure restant; la capacité du tube à zéro sera Dilatation du fer et du platine.

$41^{cb.},2$; $\frac{41^{cb.},2}{387}$ sera sa dilatation à 100° (919); $\frac{11}{55}=0,2$ celle du mercure, et on aura

$$0,2+\frac{41,2}{387}=0,2+x$$

x désignant la dilatation de 30cb. de fer. En en prenant la 30e partie, on aura la dilatation de l'unité de volume, et on trouve ainsi $\frac{1}{282}$ à très peu près. Le même procédé appliqué au platine donne $\frac{1}{377}$.

925. En général, dans les solides, on a plutôt besoin de connaître la dilatation en longueur que la dilatation *cubique* ou du volume entier; mais, quand on connaît l'une, il est facile de calculer l'autre. En effet, la forme ne changeant pas (893), les volumes aux deux températures sont comme les cubes des dimensions homologues, c'est-à-dire qu'on a : La dilatation linéaire est le tiers de la dilatation cubique.

$$v : v' :: l^3 : l'^3.$$

Si nous considérons seulement l'unité de volume et l'unité de longueur, et si nous appliquons notre calcul au fer, la proportion deviendra

$$1 : 1+\frac{1}{282} :: 1 : (1+x)^3,$$

x représentant la dilatation *linéaire* du fer. De là on tire

$$\frac{1}{282} = 3x + 3x^2 + x^3,$$

ce qui montre que x n'est pas même le tiers de $\frac{1}{282}$; par conséquent x ne vaut pas $\frac{1}{70000}$; x^3 est encore plus petit; négligeant donc ces quantités, on a

$$x = \frac{1}{846};$$

et comme les dilatations des solides sont toujours très petites, on voit, en généralisant, que la dilatation linéaire est le tiers de la dilatation cubique.

Dilatation du cuivre. Pyromètre de Borda. Fig. 304.

926. Le procédé que nous avons indiqué pour mesurer la dilatation des métaux n'étant pas applicable à ceux que le mercure peut dissoudre, comme l'or, l'argent, le cuivre, etc. MM. Dulong et Petit les ont comparés au fer, à l'aide d'un appareil dont la première idée appartient à Borda. Dans une auge contenant un liquide dont on faisait varier la température, ils avaient établi deux règles parallèles et égales, l'une de fer et l'autre du métal qu'on voulait lui comparer. Ces règles étaient solidement réunies par un bout, de sorte que la différence dans l'allongement ne pouvait se manifester qu'à l'autre. Deux montants, implantés perpendiculairement sur les extrémités libres, sortaient de l'auge et se terminaient par deux petites règles parallèles aux grandes, portant des divisions. On notait les divisions qui coïncidaient à la température de 0, et l'on voyait à 100° de combien l'une avait dépassé l'autre. La différence venait uniquement de l'allongement des grandes règles, parce que tout le reste était du même métal. Or, sans mesurer, on sait que la règle de fer, qui avait 1200^{mm} à zéro, s'allongeait de $\frac{1200^{mm}}{846}$ en passant à 100°: le cuivre s'allongeait un peu plus; et l'excédant, ajouté à $\frac{1200^{mm}}{846}$ donnait évidemment sa dilatation totale, qu'on a trouvée ainsi être la 582[e] partie de la longueur à zéro.

927. *Lavoisier* et *Laplace* ont mesuré directement la dilatation linéaire d'un très grand nombre de métaux avec un appareil qui représentait en grand le pyromètre métallique (891). Les barres avaient 5 pieds de long; elles étaient plongées dans de l'eau dont on faisait varier la température de 0 à 100°; l'aiguille était remplacée par une lunette horizontale braquée sur une mire à 600 pieds de distance. Le grand bras du levier décrivait un arc de 744 lignes pour un déplacement d'une ligne seulement dans le petit bras. Celui-ci ayant environ 10 pouces, et l'allongement des barres ne dépassant guère 2 lignes, toute l'étendue des variations angulaires était comprise dans 1°; par conséquent l'arc décrit par le petit bras était sensiblement une ligne droite confondue avec l'allongement de la barre et se trouvait sa mesure exacte. Procédé de Lavoisier et Laplace.

928. Après avoir indiqué les procédés les plus parfaits pour mesurer les dilatations des solides, des liquides et des gaz, nous donnerons le tableau des résultats auxquels on est parvenu, tant par ces procédés que par d'autres moins parfaits, mais d'une exactitude suffisante pour les applications dans les arts. Tables de dilatation.

Dilatation absolue entre 0 et 100°.

Tous les gaz	0,375	$= \frac{100}{267}$
Mercure	0,0180180	$= \frac{106}{555}$

Dilatation apparente dans le verre.

Mercure	0,0154321	$= \frac{10}{648}$
Eau	0,0433	$= \frac{1}{23}$
Eau saturée de sel marin	0,05	$= \frac{1}{20}$
Acide chlorhydrique (densité 1,137)	0,06	$= \frac{1}{17}$
Acide sulfurique (densité 1,85)	0,06	$= \frac{1}{17}$
Éther sulfurique	0,07	$= \frac{1}{14}$
Essence de térébenthine	0,07	$= \frac{1}{14}$
Huiles d'olive et de lin	0,08	$= \frac{1}{12}$
Acide nitrique (densité 1,4)	0,11	$= \frac{1}{9}$
Alcool	0,11	$= \frac{1}{9}$

Dilatation linéaire.

Flintglass anglais	0,00081166	=	$\frac{1}{1243}$
Verre en tubes	0,00086133	=	$\frac{1}{1161}$
Platine	0,00088420	=	$\frac{1}{1131}$
Palladium	0,00100000	=	$\frac{1}{1000}$
Acier non trempé	0,00107880	=	$\frac{4}{927}$
Fonte	0,00112500	=	$\frac{1}{889}$
Fer	1,00118210	=	$\frac{1}{846}$
Acier trempé et recuit	0,00123956	=	$\frac{1}{807}$
Bismuth	0,00139167	=	$\frac{1}{719}$
Or de départ	0,00146606	=	$\frac{1}{682}$
Or au titre de Paris, recuit	0,00151361	=	$\frac{1}{661}$
Or au titre de Paris, non recuit	0,00155155	=	$\frac{1}{645}$
Cuivre rouge	0,00171820	=	$\frac{1}{582}$
Bronze	0,00181667	=	$\frac{1}{550}$
Cuivre jaune	0,00186870	=	$\frac{1}{515}$
Argent	0,00190868	=	$\frac{1}{524}$
Argent de coupelle	0,00190974	=	$\frac{1}{524}$
Métal de télescope	0,00193333	=	$\frac{1}{517}$
Étain de Malaca	0,00193765	=	$\frac{1}{516}$
Étain de Falmouth	0,00217298	=	$\frac{1}{462}$
Plomb	0,00284856	=	$\frac{1}{351}$
Zinc	0,00294167	=	$\frac{1}{340}$
Zinc martelé	0,00310833	=	$\frac{1}{322}$

Ciment romain	0,00143
Certains grès	0,00117
Marbre blanc de Sicile	0,00110
Granit rouge	0,000897
Marbre de Carrare	0,000848
Autre variété	0,000654
Pierre de Saint-Leu	0,000649
Marbre de Solst	0,000568
Brique ordinaire	0,000550
Brique réfractaire	0,000493
Terre de pipe hollandaise	0,000457

Poterie de Wedgewood.............. 0,000453
Marbre noir de Galway.............. 0,000445
Pierre de Vernon-sur-Seine.......... 0,000430
Marbre de Saint-Béat................ 0,000418

Les dilatations des matières pierreuses ont été mesurées par M. *Destigny* et par M. *Adie.*

929. Dernièrement M. Thilorier a reconnu dans l'acide carbonique liquéfié une dilatation vraiment énorme, car elle est bien plus grande que celle des gaz. Il a vu une colonne de 40mm enfermée dans un tube, prendre une longueur de 60mm en passant de 0° à 30°; dans ce cas, l'allongement d'une pareille colonne d'air ne serait pas de 5mm. M. Kemp a vu depuis l'acide sulfureux liquéfié se dilater de $\frac{1}{3}$ de son volume en passant de — 10° à 100°. L'éther maintenu liquide, par la compression, se dilate aussi beaucoup plus que dans les circonstances ordinaires, de sorte que le phénomène paraît général pour les substances qu'on maintient liquides en les comprimant.

Dilatation des gaz liquéfiés.

930. On a reconnu que le verre et les substances métalliques, ainsi que tous les gaz, se dilataient uniformément entre 0° et 100° du *thermomètre à mercure*; de sorte qu'on a exactement la dilatation pour 1° en prenant la 100e partie des nombres donnés par la table. Au-dessous de zéro, l'uniformité subsiste encore jusqu'aux environs de la congélation du mercure.

Dilatation pour un degré. Cas où elle est uniforme.

931. Quant aux liquides, si on excepte le mercure, leur dilatation suit une marche très compliquée, elle n'est point du tout la même pour les différents degrés. Nous donnerons comme exemple la table du volume de l'eau à différentes températures, résultant des expériences de *Hallstrom* (947). On y prend pour unité le volume de l'eau à son maximum de densité.

Elle n'est pas uniforme dans les liquides.

Volume de l'eau à différentes températures.

Température.	*Volume.*	*Température.*	*Volume.*
0°	1,0001082	15°	1,0007357
1	1,0000617	16	1,0008747

Température.	Volume.	Température.	Volume.
2	1,0000281	17	1,0010259
3	1,0000078	18	1,0011888
4	1,0000002	19	1,0013631
4,1	1,0	20	1,0013490
5	1,0000050	21	1,0017560
6	1,0000226	22	1,0019549
7	1,0000527	23	1,0021746
8	1,0000954	24	1,0004058
9	1,0001501	25	1,0026483
10	1,0002200	26	1,0029016
11	1,0002970	27	1,0031662
12	1,0003888	28	1,0034414
13	1,0004924	29	1,0037274
14	1,0006081	30	1,0040245

Mesure des dilatations au-delà de 100°.

932. Au-delà de 100°, la dilatation pour 1° du thermomètre à mercure change dans toutes les substances et même dans les gaz. Mais comme ceux-ci continuent à s'accorder entre eux, on prend leur dilatation pour mesure des températures. On a ainsi le thermomètre à air, qui n'est pas autre chose que l'appareil servant à mesurer la dilatation de ce gaz (921). On détermine avec cet instrument la dilatation qu'éprouve une masse d'air, dont le volume à zéro est l'unité, et qui passe de cette température à celle que l'on considère sans changer de force élastique. Ensuite, puisque par définition, une dilatation de 0,00375 répond à 1°, il ne s'agit plus, pour avoir la température, que de trouver combien la dilatation totale contient de fois 0,00375.

Thermomètre à air.

Comparaison avec le thermomètre à mercure.

933. Comme il est bien plus difficile de mesurer ainsi une température avec le thermomètre à air qu'avec le thermomètre à mercure, MM. Dulong et Petit ont construit, d'après leurs expériences, une table qui donne les indications de l'un, quand on connaît celles de l'autre. Il a fallu des expériences particulières pour tenir compte de la dilatation du verre au-delà de 100°.

Therm. à mercure.	Therm. à air.
— 36°	— 36°
0	0
100	100
150	148,70
200	197,05
250	145,05
300	292,70
360	350

934. MM. Dulong et Petit ont mesuré les dilatations du verre, du mercure et de plusieurs autres métaux, jusqu'à 200 et 300°, en employant une huile fixe au lieu d'eau dans les appareils dont nous avons parlé. Il résulte de leurs expériences que la dilatation pour 1° du thermomètre à air devient de plus en plus grande à mesure que l'on considère des températures plus élevées ; chaque substance, du reste, suit une marche différente dans cet accroissement.

Dilatations croissantes au-delà de 100°.

§ III. *Usage des tables de dilatation.*

935. Tant que la dilatation est uniforme, il y a une relation très simple entre le volume et la température. Prenons par exemple un litre d'air à 0° ; nous savons qu'à 1° son volume sera $1^l + \frac{1}{267}$ de litre ; à 2° $1^l + \frac{2^l}{267}$; et en général à $t°$, $1 + \frac{t}{267}$. Maintenant si nous avions supposé 2,3 litres, il est clair que, pour avoir le volume, il n'y aurait qu'à multiplier $1 + \frac{t}{267}$ par 2,3 ; de sorte qu'en désignant par V_0 le volume à zéro, par V_t le volume à $t°$ on a

Relation entre le volume et la température.

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{t}{267}\right).$$

936. La quantité $\frac{1}{267}$ qui est la dilatation de l'unité de volume pour 1°, s'appelle *coefficient de la dilatation*. Il est

Coefficient de dilatation.

évident que la formule s'appliquerait à tout autre corps qu'à l'air, y mettant le coefficient convenable ; pour le mercure, par exemple, on mettrait $\frac{1}{5550}$.

Ramener un volume à zéro.

937. Résolvons maintenant quelques questions avec cette formule :

1° On a recueilli 9 litres d'un certain gaz à 18°, on demande le volume à zéro. La formule devient

$$9 = V_0 \left(1 + \frac{18}{267}\right); \text{d'où } V_0 = 8^l, 43.$$

Capacité d'un vase à différentes températures.

2° Calculer la capacité d'un vase de verre à 18°, sachant qu'à zéro elle est de 8^l, 9956. La capacité se dilatant comme le verre qui la remplirait (898) on a

$$V_t = 8,9956 \left(1 + \frac{18}{38700}\right) \text{ d'où } V_t = 9^l \text{ à très peu près.}$$

Calcul de la température par le volume.

3° A quelle température faut-il porter une masse d'air prise à zéro, pour doubler son volume ? Soit 1 le volume primitif ; V_t sera égal à 2, on aura donc

$$2 = 1 \left(1 + \frac{t}{267}\right) \text{ d'où } t = 267,$$

comme cela était d'ailleurs évident.

Correction thermométrique.

4° Pour montrer comment on fait la correction thermométrique (859), supposons qu'un instrument marquant 80° était plongé seulement jusqu'au zéro, et admettons que la température de la tige, à partir de ce point, soit de 0°. Il est clair que le volume du mercure actuellement au-dessus de 0° représente la contraction qu'éprouverait le reste si on mettait l'instrument dans la glace fondante. Or, le volume d'une division est $\frac{1}{6480}$ du volume à zéro (930) ; si donc on ne considère que le mercure actuellement plongé, on a 6400 et 6480 pour les volumes à 0°, et à la température t que l'on cherche et qui sera dès lors donnée par l'équation

$$6480 = 6400 \left(1 + \frac{t}{6480}\right).$$

Si la tige n'était pas à zéro, on l'y ramènerait aisément

par le calcul, pourvu qu'on connût sa température : qu'elle soit par exemple à 20°, on n'aura qu'à tirer V° de la formule

$$80 = V_0 \left(1 + \frac{20}{6480}\right).$$

Relation entre la longueur et la température.

938. En raisonnant sur l'unité de longueur comme nous venons de le faire sur l'unité de volume, on arrive de même à la formule

$$L_t = L_0 (1 + kt),$$

où L_0 et L_t sont les longueurs réelles à 0° et à t° d'un même corps dont le coefficient de dilatation linéaire est k. On se servirait de cette formule pour calculer l'allongement qu'éprouvent les barres de fer employées dans les constructions, les chaînes d'un pont suspendu, etc. en passant d'une température à une autre.

Corriger l'erreur due à la dilatation de l'unité de longueur.

939. Dans les mesures précises, la dilatation des règles métalliques qui portent les divisions peut évidemment occasionner des erreurs. Supposons qu'en opérant à 17° avec un mètre de cuivre jaune, on ait trouvé entre deux points donnés une distance de $760^{mm},8$, et calculons ce qu'on aurait eu à zéro. Il est clair que le nombre des millimètres serait double si, par le froid, leur longueur se réduisait à moitié ; de sorte que ce nombre est en raison inverse de la longueur que prend le millimètre aux deux températures ; on a donc

$$760,8 : x :: 1 : 1 + \frac{17}{53500}$$

$$\text{d'où } x = 761^{mm},04.$$

On voit qu'en général, pour corriger une distance de l'erreur due à la dilatation de la mesure, il faut multiplier le résultat brut par $1 + kt$, t étant la température et k le coefficient de dilatation de la matière qui compose la mesure.

Relation entre la force élastique d'un gaz et la température.

940. De ce que l'air pris à zéro se dilate de $\frac{1}{267}$ pour un degré et conserve cependant sa force élastique, on peut conclure que si on l'échauffait de 1° sans lui permettre de

se dilater, on augmenterait sa force élastique de $\frac{1}{267}$, de sorte qu'on a

$$F' = F_0 \left(1 + \frac{t}{267}\right).$$

Quoiqu'on n'ait pas fait d'expérience directe sur la dilatation des gaz très comprimés, on peut certainement employer cette formule dans des limites très étendues, et admettre, par exemple, qu'en chauffant à 267° de l'air comprimé à 5 atmosphères, on lui en donnera 10 de force élastique.

Relation entre la densité et la température.

941. Il y a aussi une relation très simple entre la densité et la température. Prenons encore l'air pour exemple; évidemment sa densité devient moitié moindre quand son volume devient double, c'est-à-dire que les densités D_0 et D_t sont en raison inverse des volumes 1 et $1 + \frac{t}{267}$, qu'une même masse d'air présente aux températures de 0° et de $t°$; on a donc

$$D_0 : D_t :: 1 + \frac{t}{267} : 1.$$

Vitesse du son à différentes températures.

942. La mécanique rationnelle démontre, que pour avoir la vitesse du son dans l'atmosphère a une température donnée, il faut diviser la vitesse à zéro par la racine carrée de la densité de l'air à la température que l'on considère; la densité à zéro étant prise pour unité, on aura donc pour la vitesse à $t°$

$$333^m \sqrt{1 + \frac{t}{267}}$$

On trouve ainsi qu'à 16° la vitesse est de 341^m.

Expression générale du poids d'un litre d'air.

943. En se rappelant (515) qu'un litre d'air à zéro, sous la pression H millimètres, pèse $1^{gr},3 \times \frac{H}{760}$, et en observant que le poids spécifique est proportionnel à la densité, la proportion (941) donnera pour le poids d'un litre d'air, à une température quelconque, sous une pression quelconque

$$\frac{1^{gr},3 + \frac{H}{760}}{1 + \frac{t}{267}} = \frac{0,456\ H}{267 + t}.$$

944. Quand on a trouvé par expérience le poids d'un liquide ou d'un gaz remplissant à une certaine température un vase de capacité invariable, on peut calculer aisément ce qu'eût été ce poids à une température différente, en se fondant sur ce que les poids d'un même volume sont proportionnels aux densités. Supposons qu'un flacon de verre soit rempli à 20° par 100^{gr} de mercure; pour savoir ce qu'eut été ce poids à zéro, on n'a qu'à résoudre la proportion (941)

Ramener à zéro la pesée d'un liquide ou d'un gaz.

$$100 : x :: 1 : 1 + \frac{20}{5550}.$$

945. Soit 1 la capacité d'un vase de verre a 0°; à t° elle est $1 + \frac{t}{38700}$. Supposons qu'à cette température elle contienne 25 gr. d'un gaz ou d'un liquide quelconque, et admettons que le vase puisse descendre à zéro sans que la température de ce qu'il contient varie, nous n'aurions plus alors 25 gr., mais une quantité x plus petite qui sera donnée par la proportion

Corriger une pesée de la dilatation du vase.

$$x : 25 :: 1 : 1 + \frac{t}{38700}.$$

Car le poids du contenu est évidemment proportionnel à lacapacité.

946. En pesant de l'eau à différentes températures dans un flacon à l'émeri et en corrigeant le poids dans la proportion due à la dilatation du vase, on pourrait déterminer la densité de l'eau à différentes températures. *Hallstrom* a préféré pour cela se servir de la balance hydrostatique. Il cherchait le poids déplacé par une boule de verre plongée dans l'eau à différentes températures, et faisait sur le poids donné par l'expérience précisément la correction que nous

Densité de l'eau à différentes températures.

venons d'indiquer. Voici le tableau de ses résultats; la densité maximum est prise pour unité;

Température.	*Densité.*	*Température.*	*Densité.*
0	0,9998918	15	0,9992647
1	0,9999382	16	0,9991260
2	0,9999717	17	0,9989752
3	0,9999920	18	0,9988125
4	0,9999995	19	0,9986387
4,1	1,0	20	0,9984534
5	0,9999950	21	0,9982570
6	0,9999772	22	0,9980489
7	0,9999472	23	0,9978300
8	0,9999044	24	0,9976000
9	0,9998497	25	0,9973587
10	0,9997825	26	0,9971070
11	0,9997030	27	0,9968439
12	0,9996117	28	0,9965704
13	0,9995080	29	0,9962864
14	0,9993922	30	0,9959917

Calcul du volume.

947. La table des volumes (931) se déduit facilement de celle-ci, en observant que le volume est en raison inverse de la densité. Soit 1 le volume de l'eau à 4°,1, x son volume, à 10_0, on a

$$1 : x :: 0{,}9998497 : 1 \text{ d'où } x = 10002200.$$

Condition pour que la densité représente le poids spécifique.

948. Pour pouvoir passer immédiatement de la densité au poids spécifique (131), il faut, d'après la définition même du gramme, que l'eau qui sert de terme de comparaison dans la détermination d'une densité soit a 4°,1; car si elle était à une autre température, on n'aurait pas le droit de dire que chaque gramme d'eau répond à un centimètre cube. Comme il serait très difficile d'opérer toujours à 4°,1 on opère à la température où l'on se trouve, et au moyen de la table des volumes (931) on calcule le poids qui serait contenu si l'eau était au maximum de densité, en observant que les poids sont en raison inverse des volumes. Si, par

exemple, un flacon renferme 32 gr. d'eau à 16°, on fera la proportion

Poids de l'eau contenue dans un vase au maximum de densité.

$$32 : x :: 1 : 1,0008747.$$

Avec la table des densités x serait donné par une division.

Corrections thermométriques pour la densité des liquides.

949. Nous sommes en état de voir maintenant comme on détermine une densité en ayant égard à la température. Prenons le mercure pour exemple; après en avoir pesé ce qui peut remplir un flacon à l'émeri en opérant à une température quelconque, mais connue, on ramènera le poids à ce qu'il eût été, 1° si on avait opéré dans un vase à zéro (945); 2° si le mercure eût été à zéro lui-même (944). Ensuite on cherchera le poids de l'eau à 4°,1 (948) capable de remplir le flacon, supposé lui-même à zéro (945); le rapport des deux poids donnera la densité rigoureusement définie. On a trouvé ainsi pour le mercure 13,598. Si le mercure et l'eau se trouvaient à la même température, on conçoit qu'il serait inutile de ramener la capacité du vase à zéro; d'ailleurs cette correction de la dilatation du vase est si petite dans les circonstances ordinaires, qu'on peut très bien la négliger.

Corrections thermométriques pour la densité des gaz.

950. Le procédé est exactement le même pour la densité de l'air par rapport à l'eau; seulement les corrections sont encore plus nécessaires, parce qu'on opère dans des vases très grands, et que la densité du gaz varie considérablement avec la température; nous avons vu précédemment (575) comment on avait égard à la pression. Quant à la densité des gaz par rapport à l'air, les poids seraient ramenés tous les deux à zéro (944), si la température était différente, et si elle était la même il n'y aurait aucune correction relative à la chaleur; car, si l'air est 14 fois aussi lourd que l'hydrogène à 20°, il en sera de même à toute autre température, à cause de l'égalité parfaite de la dilatation (923).

Corrections thermométriques pour la densité des solides.

951. Pour les solides, le procédé est un peu plus simple que pour les liquides, parce que les deux corps que l'on compare sont naturellement à la même température. Supposons, par exemple, qu'en opérant à 15° avec le flacon à l'émeri, la

balance hydrostatique ou l'aréomètre de Nicholson, on ait trouvé 25 grammes pour le poids de l'eau déplacée par un morceau de cuivre; on calculera d'abord le poids (de cette même eau à 15°) qu'eût déplacé le cuivre supposé à zéro (945). Ce calcul se fait précisément comme s'il s'agissait d'un *vase*. Connaissant ainsi le poids de l'eau à 15° capable de remplir un certain espace, il sera facile de trouver ce qu'aurait été ce poids si l'eau eût été à 4°,1 (948).

Mesure exacte de la capacité d'un vase.

952. La connaissance de la densité du mercure à différentes températures donne un moyen extrêmement précis de mesurer la capacité d'un vase à une température quelconque t; un centimètre cube de mercure pèse alors (943).

$$\frac{13^{gr},598}{1+\frac{t}{5550}}$$

Il n'y aura donc qu'à chercher combien de fois ce poids est contenu dans le poids total qui remplit le vase. Il faudrait en général une erreur de plus de 13 milligrammes sur la pesée pour produire une erreur d'un millième de centimètre cube sur la capacité.

Corrections barométriques, 1o dilatation de l'échelle.

953. Pour que les hauteurs des baromètres pris à différentes températures soient comparables, il faut d'abord tenir compte de la dilatation de la règle avec laquelle on les mesure; nous avons vu comment on calculait le nombre de millimètres qu'on eût trouvé, si l'échelle eût été à zéro (939).

2o Dilatation du mercure.

954. La correction due à la dilatation du mercure est encore plus importante. Quand ce liquide se dilate, il devient plus léger, il en faut une colonne plus haute pour faire équilibre à la pression; de sorte que deux baromètres, l'un chaud et l'autre froid, donnent des indications différentes, bien que la pression de l'air soit la même. De là la nécessité de ramener toutes les observations à la même température; on a choisi naturellement celle de zéro.

Soit $761^{mm},04$ la hauteur observée à 17° et déjà corrigée de la dilatation de l'échelle; x celle qui aurait eu lieu avec du

mercure à 0° ; les hauteurs nécessaires à l'équilibre étant en raison inverse des densités (357) (941), on a

$$761,04 : x :: 1 + \frac{17}{5550} : 1 ; \text{ d'où } x = 758^{m}, 62.$$

Correction de la formule barométrique.

955. La formule barométrique telle que nous l'avons établie suppose l'air à zéro. Dans ce cas nous avons trouvé par exemple qu'il en fallait une colonne de $4196^{m}, 65$ pour faire équilibre à $0^{m}, 3018$ de mercure ; mais il est évident que la colonne nécessaire à cet équilibre doit être plus haute si l'air est chaud, puisqu'alors il est plus léger. Soient t et t' les températures aux deux stations ; on prend par approximation, la température moyenne $\frac{t+t'}{2}$ pour celle de la colonne entière. De plus, pour simplifier et tenir compte de la vapeur d'eau qui est dans l'atmosphère, on admet $\frac{1}{250}$ au lieu de $\frac{1}{267}$ pour coefficient de la dilatation de l'air. D'après cela la densité moyenne de la colonne froide étant 1, celle de la colonne échauffée sera

$$\frac{1}{1 + \frac{t+t'}{2 \times 250}} = \frac{1}{1 + \frac{2(t+t)}{1000}},$$

Maintenant les hauteurs z et Z nécessaires à l'équilibre étant en raison inverse des densités, on a

$$z : Z :: \frac{1}{1 + \frac{2(t+t')}{1000}} : 1$$

d'où $Z = z\left(1 + \frac{2(t+t')}{1000}\right)$; et si on met pour z sa valeur (600) il vient

$$Z = 18393\left(1 + \frac{2(t+t')}{1000}\right)\log.\frac{h_{0}}{h_{z}}$$

Pendule compensateur. Fig. 305.

956. Nous indiquerons encore, comme application remarquable des coefficients de dilatation, la manière ordinaire de corriger les changements produits par la chaleur sur les pendules qui règlent les horloges. Celles-ci retardent, comme on sait, quand la lentille descend par l'allongement de la tige. Pour prévenir cet inconvénient la tige T qui est en fer s'attache à la traverse supérieure d'un cadre dont les deux montants CC, qui sont en cuivre, s'implantent dans la traverse inférieure d'un second cadre dont les montants FF sont en fer. Nous supposerons d'abord l'appareil suspendu par la petite tige t. Il est clair que si la lentille descend par l'allongement du fer, elle remonte par la dilatation du cuivre; il y aura compensation si

$$\frac{1}{846}(t+\mathrm{F}+\mathrm{T}) = \frac{1}{515}\mathrm{C};$$

c'est-à-dire si les longueurs des métaux sont en raison inverse des coefficients de dilatation. Or cela est impossible avec deux cadres ainsi disposés, puisque la longueur du fer est plus que double de celle du cuivre; mais cela peut se faire en supprimant la traverse supérieure et en attachant les deux tiges $m\,n$ en $m'\,n'$ dans deux autres cadres où le cuivre, presque égal au fer, achèvera de remonter la lentille. La tige t qui suspend le tout est fixée sur le cadre extérieur. La compensation se finit par tâtonnement, en retouchant les tiges jusqu'à ce que l'horloge réglée par le pendule conserve la même marche dans un appartement très froid et dans une étuve à 30 ou 40°. Le problème est réellement plus compliqué qu'il ne paraît, parce que d'abord le centre de gravité de l'appareil s'élève à cause de la tige qu'on ajoute, et qu'ensuite ce qui doit être invariable dans le pendule composé, c'est la distance du point de suspension, non pas au centre de gravité, mais un certain point appelé *centre d'oscillation*, qui se trouve toujours au-dessous du centre de gravité, et plus ou moins loin, suivant la forme du pendule et le poids de ses différentes parties.

Compensa-

957. Quand le ressort spiral et le balancier HK (342),

qui règlent le mouvement dans une montre, viennent à se dilater, les oscillations se font plus lentement et la montre retarde. Mais on parvient à maintenir la durée des oscillations invariable en ajoutant au balancier deux lames courbes *ll* composées de deux métaux, comme dans le thermomètre de Bréguet (894), et terminées par deux petites masses *m m*. Le métal le *plus dilatable* étant en dehors, l'effet de la chaleur est d'augmenter la courbure de sorte que les petites masses sont raprochées du centre ; ce qui tend à rendre l'oscillation plus rapide. En mettant les masses plus ou moins loin du bout des lames, on finit, à force de tâtonnements, par obtenir une compensation parfaite.

tion dans les montres.

Fig. 306.

CHAPITRE III.

CHANGEMENTS D'ÉTAT.

§ 1er. *Fusion et solidification.*

Phénomène de la fusion.

958. Quand on chauffe un morceau de plomb, on le voit passer par différents degrés de mollesse, puis enfin se liquéfier. Ce phénomène, mieux encore que la dilatation, montre combien la chaleur diminue la force attractive des molécules.

Il est général.

959. A mesure qu'on a perfectionné l'art de produire et de concentrer la chaleur, la liste des substances fusibles s'est tellement accrue qu'on en est arrivé à regarder le phénomène de la fusion comme général. Maintenant on fond toutes les substances qui ne se décomposent pas par la chaleur ; il n'y a guère que le diamant ou le charbon pur qui aient jusqu'à présent résisté.

Invariabilité du point de fusion.

960. Chaque substance se fond à une température déterminée et toujours la même, de quelque manière qu'on applique la chaleur. C'est un fait que nous avons déjà re-

reconnu pour la glace (840), et qui se véri fie pour un corps quelconque, si on a bien soin de prendre la température au moment où la fusion commence. Le point de fusion, à cause de son invariabilité, fournit même un très bon moyen de distinguer certaines substances.

961. *Table des points de fusion.*

	Thermomètre centigrade.
Glace	0°
Huile d'olives	4
Beurre	32
Suif	33
Blanc de baleine	45
Cire non blanchie	61
Cire blanchie	68
Phosphore	43
Beurre de cacao	40
Potassium	58
Sodium	90
Alliage de 1 de plomb, 1 d'étain, 2 de bismuth	94
Iode	107
Soufre	109
Camphre	175
Étain	228
Bismuth	246
Plomb	322
Zinc	374
Antimoine	425
Argent pur	999
Argent allié avec $\frac{1}{10}$ d'or	1048.

	Pyromètre de Wedgewood.
Argent	20°
Cuivre	27
Or	32
Cobalt	130
Acier	130

	Pyrometre de Wedgewood.
Fer pur	158
Nickel	160
Manganèse	160
Chrome	170

962. Le platine, le palladium, et quelques autres métaux, sont infusibles au feu de forge, mais on les fond avec des miroirs ardents ou le chalumeau à gaz (561). Il en est de même de la silice et de l'alumine, qui constituent les argiles *réfractaires*, et la plupart des pierres précieuses. Substances infusibles au feu de forge.

963. On profite quelquefois de la différence de fusibilité pour séparer diverses substances; ainsi on sépare le plomb du cuivre en chauffant l'alliage à un certain degré; le plomb s'écoule, et le cuivre reste en masse poreuse : ce procédé est connu sous le nom de *liquation;* il n'est pas généralement applicable, à cause de l'affinité plus ou moins forte qui réunit les deux métaux. Ainsi, par la *liquation*, on ne séparerait pas le plomb de l'argent. Applications. Liquation.

964. On fait avec le plomb, le bismuth et l'étain, des alliages qui fondent à différentes températures, depuis 100 jusqu'à 200° : par exemple, si, pour prévenir l'explosion, on veut que la température ne s'élève pas au-dessus de 150°, dans une chaudière à vapeur, on y ménage une *ouverture*, qu'on ferme avec une plaque d'alliage, en proportion convenable, pour se fondre à cette température. Pour qu'elle ne se déforme pas avant de se fondre, la plaque fusible est maintenue par une petite grille. Rondelles fusibles.

965. On n'a pas exactement déterminé la température à laquelle fondent les différents sels. En général la chaleur rouge est plus que suffisante; à cette température le nitre et même le sel marin coulent comme de l'eau. Quand on chauffe un sel qui contient de l'eau de cristallisation, du borax, par exemple, on le voit fondre d'abord dans cette eau, puis se dessécher à mesure qu'elle s'évapore; ensuite il fond par la chaleur seule; de sorte qu'on distingue la fusion *aqueuse* et la fusion *ignée*. Fusibilité des sels. Fusion aqueuse. Fusion ignée.

966. Ce qui jette quelquefois de l'incertitude sur le point Cause d'incertitude sur le point de fusion.

de fusion, c'est que certaines substances se ramollissent peu à peu, et n'arrivent à la liquidité parfaite que par degrés insensibles.

Disparition de chaleur pendant la fusion.

967. Une circonstance bien remarquable qui accompagne toujours la fusion, c'est qu'il disparaît, pendant qu'elle s'opère, une quantité de chaleur très considérable. Qu'on mette un vase plein de glace sur un brasier ardent; on ne s'apercevra pas de la plus légère élévation de température jusqu'à ce que tout soit fondu; l'énorme quantité de chaleur fournie au vase, pendant une heure peut-être, aura complétement disparu, employée toute entière à fondre la glace sans élever la température. Chaque substance, suivant sa nature, exige ainsi une certaine quantité de chaleur pour passer de l'état solide à l'état liquide; nous verrons plus loin comment on peut mesurer cette chaleur, qu'on appelle *latente*.

Solidification.

968. Quand un métal fondu repasse à l'état solide, on a évidemment un phénomène du même genre que la congélation de l'eau; c'est toujours un effet de la diminution de chaleur. En général une substance se solidifie précisément à la température où elle commence à fondre. Ainsi un thermomètre marque le même degré dans l'étain quand il se prend en masse ou quand il entre en fusion. Cela se conçoit quand on observe que la température variant par degrés insensibles, la différence entre le point où l'eau est encore liquide et le point où elle commence à geler doit être plus petite que toute quantité assignable. Ainsi à zéro la glace fond où l'eau gèle, suivant qu'on est dans une période croissante ou décroissante de température. D'après cela, la table des points de fusion donne la température où les substances fondues commencent à se solidifier; nous ajouterons seulement ici les points de congélation de quelques substances qui restent liquides au-dessous de zéro.

Température à laquelle elle s'opère.

Substances qui ne se congèlent qu'au-dessous de zéro.

969. Eau de mer.	— 2° 5
Huile de navette.	— 4°
— d'olive.	— 6°
— de colza	— 6°

Huile d'amandes douces . . . . }	— 10°
— de térébenthine . . . . }	
— d'œillet.	— 18°
— de noix . . . }	
— de chenevis . }	— 27°
— de lin . . . . }	
Mercure	— 39°
Acide carbonique	— 90°

970. Relativement aux huiles, nous remarquerons qu'elles commencent à s'épaissir bien avant de se solidifier : ainsi l'huile d'olives s'épaissit à + 4°; celle d'œillet à — 2°, celle de lin à — 20°. Remarque.

971. Il y a un grand nombre de liquides qu'on n'a jamais pu congeler : tels sont l'éther, l'esprit-de-vin, etc.; mais l'analogie fait supposer que ces exceptions disparaîtraient si on avait les moyens d'abaisser à volonté la température. Liquides qui ne se congèlent pas.

972. Nous examinerons avec quelque détail la formation de la glace. Supposons que par une forte gelée on mette sur un support solide un vase contenant de l'eau parfaitement pure, avec un thermomètre plongé dans le liquide, et qu'on recouvre le tout d'une cloche pour éviter les mouvements de l'air; on verra l'eau descendre à — 5 ou — 6° sans se geler. Dans des tubes étroits, où il ne peut guère s'établir de mouvement, l'eau reste liquide à plusieurs degrés au-dessous de zéro, ainsi que cela résulte des expériences de M. Desprets; cela explique en partie comment les substances organisées résistent souvent à la gelée. M. Gay-Lussac, ayant eu la précaution de recouvrir d'une couche d'huile l'eau contenue dans un vase, l'a vue encore liquide à — 11°. Quand l'eau est ainsi liquide au-dessous de zéro, le moindre choc suffit pour déterminer instantanément la congélation d'une partie de la masse. Blagden, qui a le premier observé ce phénomène, ayant pris le vase pour le transporter, vit l'eau se geler tout à coup par l'agitation que lui donna un faux pas. Cependant une agitation brusque réussit moins bien qu'une vibration

Circonstances de la congélation de l'eau.

Eau liquide au-dessous de zéro.

produite dans le vase par un léger choc. On produit encore immédiatement la congélation en mettant un petit glaçon dans le liquide. L'eau un peu sale se gèle précisément à zéro, parce que les corps qu'elle tient en suspension s'y déplacent pendant les changements de densité.

Production de chaleur pendant la congélation.

973. Un fait bien remarquable, c'est que dans cette expérience le thermomètre remonte à zéro à l'instant où l'eau se gèle, de sorte que le point de congélation reste réellement à zéro. Mais en outre ce phénomène montre qu'il se produit de la chaleur pendant la congélation; et on peut encore en avoir la preuve en mettant dans de l'eau à zéro un morceau de glace refroidi à — 20° par exemple; on le verra se recouvrir de nouvelles couches de glace et en même temps se réchauffer jusqu'à zéro. D'ailleurs cette production de chaleur, par le fait même de la solidification, a lieu dans les circonstances ordinaires. On sait très bien que de l'eau exposée à une forte gelée ne se prend pas instantanément et en entier dès qu'elle est arrivée à zéro; la chaleur dégagée par les parties qui se gèlent entretient la fluidité du reste; et c'est ainsi qu'on s'explique comment, par un froid de plusieurs degrés au-dessous de zéro, la masse puisse se maintenir à zéro pendant des heures entières, c'est-à-dire pendant tout le temps que dure la congélation. Nous voyons donc reparaître lors du passage à l'état solide la chaleur qui avait disparu dans le passage à l'état liquide (967). C'est d'ailleurs un phénomène général comme nous le reconnaîtrons en mesurant la chaleur que les différentes substances dégagent dans ce cas.

Cristallisation de l'eau.

974. Quand la congélation marche avec lenteur, on la voit se faire d'abord à la surface et près des parois. De longues aiguilles cristallines s'étendent ensuite en s'entrecroisant dans le liquide, donnant naissance à d'autres aiguilles qui naissent des premières sous un angle de 60°. C'est en se groupant ainsi, avec une certaine régularité, que les molécules d'eau prennent l'état solide.

Dilatation pendant la congélation.

975. Par cette nouvelle disposition, le volume de la masse augmente, et même, comme la dilatation se manifeste à partir de + 4° (902), il faut admettre que les molé-

cules commencent dès lors à se grouper comme elles doivent l'être à l'état solide. Souvent au milieu de la surface qui est gelée il reste une ouverture par où le liquide intérieur déborde, ce qui est un effet évident de la dilatation; si ce trou se ferme trop tôt, la croûte déjà glacée se fend avec bruit; ou si on la perce avec une épingle on voit le liquide jaillir quelquefois à plusieurs pouces. La dilatation totale de la glace sans bulles d'air est de $\frac{1}{13}$ environ, comme on peut s'en assurer en observant que le volume d'un gramme de glace $= \frac{1}{0,93}$ et surpasse par conséquent de $\frac{1}{13}$ celui d'un gramme d'eau (136). Quant à la densité elle se mesure à l'aide du flacon à l'émeri; l'eau qui sort a bien le même volume que la glace, car celle-ci n'a pas le temps de fondre pendant qu'on la plonge. Le vide restant après la fusion donnerait directement l'accroissement de volume. Observons d'ailleurs qu'on n'a pas besoin d'expériences précises pour savoir que la glace est plus légère que l'eau, puisqu'on la voit toujours flotter sur ce liquide. L'accroissement de volume est aussi bien évident par la forme bombée que prend la surface de l'eau qui se gèle dans un vase. Au reste l'eau n'est pas la seule substance qui se dilate en se solidifiant. La fonte, le bismuth présentent le même phénomène; c'est même pour cela que la fonte peut se mouler aussi exactement, et que le bismuth coulé dans un tube de verre le brise au moment où il se solidifie.

Densité de la glace.

976. La dilatation de l'eau quand elle se gèle se fait avec une force vraiment énorme; des canons de fusil exactement remplis d'eau et bien fermés, étant exposés à la gelée, sont fendus infailliblement. Hales ayant rempli d'eau une bombe de plus d'un pouce d'épaisseur et l'ayant fermée avec un bouchon maintenu par toute la force d'un pressoir, l'entoura de glace pilée et de sel pour produire la congélation; il opérait d'ailleurs par une forte gelée. La bombe se fendit en trois morceaux par l'effort de la glace qui cependant n'avait encore que 3/4 de pouce d'épaisseur. Dans l'Amérique du Nord, où on avait fait des expériences analogues par un froid de $-20°$, les tampons sautèrent avant

Force de dilatation.

que tout fût gelé, et l'eau qui les poussait forma un mamelon de glace saillant à l'orifice. On avait pensé d'après cela que peut-être l'eau ne pourrait pas se geler si on l'empêchait de se dilater, mais on n'a pas le droit de tirer cette conclusion. Du reste on n'est pas surpris après ces expériences de voir les vases remplis d'eau, et qui ont un goulot étroit, se casser par la gelée ; cela arrive même quand on les laisse ouverts, parce que la glace qui se produit d'abord dans le goulot ferme réellement le vase. Certaines pierres qu'on appelle *gelives* se fendillent quand l'eau qu'elles ont absorbée se gèle. Une dissolution de sulfate de soude qu'on fait pénétrer dans les pores de ces pierres produit le même effet en cristallisant ; cela fournit un moyen de reconnaître les pierres gelives.

Pierres gelives.

Désorganisation des tissus végétaux et animaux.

977. On conçoit que le tissu des plantes et des fruits plus ou moins pénétré de liquides puisse se déchirer par l'expansion de petits glaçons qui s'y forment ; et on se rend ainsi compte de la désorganisation qui suit la gelée. La même chose doit arriver dans un membre gelé, car l'eau y forme au moins les 0,9 du poids des liquides. Cependant la vie peut s'y rétablir si on a soin de ne le réchauffer que par degrés en le frottant d'abord avec des corps très froids, même avec de la neige.

Séparation de l'air pendant la congélation de l'eau.

978. Les glaçons présentent presque toujours des bulles, ce qui montre que l'air en dissolution dans l'eau s'en sépare au moment où elle passe à l'état solide. Ces bulles, quelquefois très volumineuses, contribuent certainement à la dilatation, mais elles n'en sont pas la seule cause puisqu'on l'observe dans de l'eau bouillie et parfaitement purgée d'air.

L'eau sans air gèle moins vite.

La dilatation de $\frac{1}{13}$ que nous avons reconnue se rapporte à l'eau sans air ; avec de l'air elle peut aller à $\frac{1}{9}$. *Black* a constaté que l'eau contenant de l'air gelait plus vite que l'eau bouillie, mais celle-ci gelait aussi vite dès qu'il l'agitait seulement avec un cure-dent.

Séparation de certains sels.

979. Certains sels se séparent aussi de l'eau pendant la congélation ; aussi dans les pays très froids, pour obtenir le sel marin, on fait arriver l'eau de la mer dans des bassins peu profonds, où le liquide se divise en deux parties, l'une

qui gèle, c'est de l'eau presque pure, l'autre qui est une dissolution saturée qui ne gèlerait guère qu'à — 20° et dont on retire le sel en chassant l'eau par l'évaporation.

980. L'eau mêlée avec 12 ou 15 centièmes d'alcool se sépare également en deux parties par le froid, une partie aqueuse qui gèle et une partie spiritueuse qui reste fluide. Aussi, quand on perce la glace qui s'est formée à l'intérieur d'un tonneau pendant la gelée, le vin qui s'écoule est-il beaucoup plus fort; mais en revanche ce qui reste ne contient plus que très peu d'alcool. Séparation de l'alcool.

981. Toutes choses égales, l'eau gèle d'autant plus difficilement qu'elle est plus profonde; ainsi, une faible gelée fait prendre une mare avant qu'il y ait encore de glace sur un étang, ni, à plus forte raison, sur un lac ou sur la mer. Cela provient de ce que les molécules de la surface, qui sont les premières à se refroidir, ne restent pas au-dessus, mais descendent, parce qu'elles deviennent plus lourdes (902). D'autres moins froides les remplacent, et, s'il s'agit d'eau douce, ces courants ascendants et descendants durent tant que la masse n'a pas atteint la température de 4°, ce qui demande un temps très long quand la profondeur est un peu grande. Dans l'eau de mer, les courants continuent jusqu'à la température de la congélation (902), de sorte que celle-ci doit se faire encore plus tard à profondeur égale; mais de plus l'agitation contribue à répartir le refroidissement dans toute la masse. C'est cette dernière raison qui fait que les rivières gèlent plus tard que les eaux stagnantes; les couches superficielles, continuellement brisées par le courant, n'ont pas le temps de se refroidir isolément; la congélation ne peut guère commencer avant que la masse entière soit descendue à zéro. Les eaux profondes gèlent difficilement. Il en est de même des eaux en mouvement.

982. Dans les eaux tranquilles les premiers glaçons se forment à la surface à une époque où les couches inférieures sont encore à 2 ou 3° au-dessus de zéro. Dans les rivières, la congélation commence ordinairement près des bords où l'eau est moins profonde et moins agitée; mais précisément à cause de l'égalité de température due à l'agitation, la glace, dans le courant proprement dit, peut se for- Dans les eaux tranquilles la glace se forme à la surface.

Dans les rivières elle peut se former au fond.

mer à une profondeur quelconque, et particulièrement sur le fond où les inégalités déterminent en quelque sorte la cristallisation. Là d'ailleurs le mouvement est moins rapide, de sorte que les cristaux peuvent se réunir plus facilement. Les glaçons ainsi formés sont ordinairement en masse spongieuse plus ou moins adhérente au gravier, aux plantes, etc. Quelquefois, en remontant à cause de sa légèreté, cette glace entraîne les corps sur lesquels elle était fixée. On a vu des chaînes, depuis long-temps tombées au fond de l'eau, être ainsi ramenées à la surface. Les glaçons qu'une rivière charrie et qui proviennent soit du fond, soit du bord d'où le courant les a détachés, s'accroissent comme les cristaux qu'on met dans une dissolution saline; ils se soudent en déterminant la solidification des parties intermédiaires; aussi la glace des rivières n'est-elle jamais unie comme celle d'une eau tranquille.

Glaciers, leur origine.

983. Les neiges perpétuelles sont quelquefois situées de manière qu'elles se ramollissent et s'impreignent d'eau pendant les journées chaudes de l'été; elles reprennent ensuite de la solidité; c'est ainsi que les glaciers se forment. Lorsque ces amas de glace sont placés sur un terrain déclive, leur propre poids leur donne un mouvement lent, de sorte qu'ils se prolongent souvent bien au-dessous des limites des neiges perpétuelles.

Solidité de la glace.

984. Pour donner une idée de la solidité de la glace, on peut citer l'histoire du palais construit à Pétersbourg en 1740 avec des glaces tirées de la Newa. Devant ce palais étaient des canons également en glace; chargés de 3 onces de poudre, ils lançaient, sans éclater, des boulets capables de percer à 60 pas une planche épaisse de 2 pouces. L'épaisseur des canons était de 4 pouces.

§ II. *Formation et liquéfaction des vapeurs.*

Expérience qui met en évidence la vapeur et ses principales propriétés. Fig. 307.

985. La plupart des corps se transforment en gaz quand on les chauffe. Pour voir bien nettement ce phénomène, prenons un tube semblable à celui dont on se sert pour établir la loi de Mariotte, mais rempli de mercure de A en B.

Entre le mercure et le verre en A, se trouve emprisonnée une goutte d'éther, liquide très facile à vaporiser; si nous plongeons cet appareil dans de l'eau chaude, nous verrons tout à coup l'éther se transformer en un gaz qui, par sa force élastique, refoulera le mercure jusqu'en A′, soutenant la colonne A′ B′, et la pression de l'atmosphère. En secouant le tube nous reconnaîtrons que ce gaz est élastique comme l'air; il est d'ailleurs transparent et invisible comme lui, mais il en diffère en ce qu'il se réduit à un liquide dès qu'on lui enlève de la chaleur en plongeant, par exemple, le tube dans de l'eau froide, ou, dès qu'on le comprime, en versant une certaine quantité de mercure dans la longue branche.

986. En physique on donne le nom de *vapeurs* aux gaz qu'on peut ainsi liquéfier aisément par la compression ou par le froid. Les vapeurs ont donc la même transparence que les gaz et comme eux ne sont visibles que quand elles sont colorées; ainsi on voit la vapeur d'iode qui est violette, celle de brôme qui est orangée; mais on ne voit pas la vapeur d'eau. Définition de la vapeur.

987. Dans le langage ordinaire on entend par vapeur quelque chose de visible et qui ressemble à de la fumée, mais la distinction est facile. Ainsi la matière des brouillards et des nuages, qui est toujours visible et plus ou moins opaque, n'est point une véritable vapeur, c'est un amas de vésicules infiniment petites formées par de l'eau liquide comme les bulles de savon. Par extension, on donne à cet assemblage de vésicules le nom de vapeur vésiculaire. L'eau prend presque toujours cette disposition au moment où on liquéfie la vapeur mêlée d'air. Nous verrons, en parlant de l'arc-en-ciel, un moyen très simple de s'assurer que l'eau ne forme pas alors de petites gouttes solides. Vapeur vésiculaire.

988. La température à laquelle commence la vaporisation n'est pas la même pour les différentes substances : à 0° l'acide sulfurique concentré n'émet pas encore de vapeurs, on peut s'en assurer en suspendant au-dessus de l'acide un peu de baryte qui reste pure tant que le thermomètre ne Température de la vaporisation pour liquides.

s'élève pas beaucoup au-dessus de zéro. A cette température le mercure se vaporise déjà, car une feuille d'or suspendue au-dessus du métal est, au bout de quelque temps, blanchie par sa vapeur ; il faudrait maintenir la température à — 10° environ pour qu'il n'y eût pas de vaporisation. A la température ordinaire la plupart des liquides se vaporisent ; cela est évident pour l'eau que nous voyons continuellement diminuer dans les vases ouverts, de même pour l'alcool, la plupart des acides, l'éther, les huiles essentielles ainsi reconnaissables par leur odeur. Les huiles fixes exigent une température plus élevée, qui d'ailleurs les décompose en partie.

Substances qui se volatilisent avant de fondre.

989. Plusieurs substances solides se vaporisent très bien dans les circonstances ordinaires; ainsi du camphre mis à l'air a bientôt disparu ; si on le conserve dans un flacon il se sublime à la partie supérieure. La glace même dans les plus grands froids diminue par l'évaporation ; l'iode et l'arsenic se volatilisent aussi bien avant de fondre. Il est probable que l'odeur de certains corps, quand on les frotte ou quand on les chauffe, provient d'un commencement de volatilisation ; le soufre et plusieurs métaux sont dans ce cas.

Relation entre la fusibilité et la volatilité.

990. Ordinairement les substances les plus fusibles sont celles qui se volatilisent le plus facilement; mais il y a des exceptions. Ainsi, par exemple, l'étain qui fond si vite reste fixe à la chaleur blanche, tandis que le zinc, bien plus difficile à fondre, peut être distillé à cette température.

Métaux volatils.

991. Voici la liste des métaux qu'on a volatilisés.

Mercure à 0°.

Arsenic vers 180°.

Cadmium, Tellure } vers 360°.

Potassium, Sodium } à la chaleur rouge.

Zinc à la chaleur blanche.

Plomb, Bismuth, Antimoine, Argent } *idem*, mais plus difficilement que le zinc.

Or Platine	Au foyer d'un miroir ardent.

992. Les autres métaux sont fixes ou n'ont pas été encore convenablement essayés à cause de leur facilité à s'oxider; mais on peut citer comme substances absolument fixes, à la plus haute températnre qu'on ait pu produire, l'alumine, la silice, le carbone, etc. Substances fixes.

993. En revanche il y a des gaz qu'on n'a jamais pu amener à l'état liquide ni par le refroidissement ni par la compression; tels sont l'oxigène, l'hydrogène, l'azote, l'air, etc. Nous avons donné la liste des gaz qu'on était parvenu à liquéfier (516). La pression joue un grand rôle dans cette liquéfaction; cependant, dans quelques cas au moins, le refroidissement seul suffit; ainsi l'acide sulfureux reste liquide sous la pression ordinaire à la température de — 10°. Gaz permanents. Gaz liquéfiés.

994. La différence de volatilité s'emploie très souvent pour séparer les diverses substances; ainsi pour purifier le zinc, on le met dans une cornue de grès ou de fonte, qu'on chauffe jusqu'au rouge blanc; les vapeurs viennent se condenser dans le col, et le métal pur coule goutte à goutte. On opère de même pour séparer le mercure de l'étain ou de tout autre métal peu volatil. Mais la distillation s'emploie surtout pour les liqueurs spiritueuses et pour les huiles essentielles. On se sert alors d'un *alambic*, appareil formé de trois parties principales, la *cucurbite* A, le *chapiteau* B et le *serpentin* C. Supposons qu'on mette du vin dans la cucurbite; l'alcool qui entre dans sa composition, étant plus volatil que l'eau, s'élèvera en vapeurs dès qu'on chauffera; ces vapeurs rempliront successivement le chapiteau et le serpentin, mais là elles seront ramenées à l'état liquide à cause de l'eau froide qui baigne le tube, de sorte que l'alcool s'écoulera en *d*. Il ne faut pas croire cependant qu'on obtienne ainsi de l'alcool pur, car de l'eau se volatilise avec lui; on aura même, par cette première distillation, plus d'eau que d'alcool, parce que dans le vin il y a bien moins d'alcool que d'eau et que la Applications, distillation. Alambic. Fig. 308.

quantité compense la moindre volatilité. Mais en distillant le premier produit on en obtient un second plus riche en alcool; cependant pour avoir de l'alcool absolu on est obligé de retenir l'eau à l'aide du chlorure de calcium.

Pour entretenir fraîche l'eau du serpentin, on verse de temps en temps de l'eau froide par l'entonnoir *f*, qui plonge jusqu'au fond du vase; l'eau chaude plus légère gagne la partie supérieure et s'écoule par le robinet *g*.

Bain-marie.

995. On appelle *bain-marie* un vase ordinairement en étain, qui entre exactement dans la cucurbite; il est baigné par l'eau bouillante dont la vapeur sort en *a;* on y met les substances qui pourraient être altérées par l'action directe du feu. On fait aussi une espèce bain-marie avec un double fond percé de trous qu'on établit dans le cucurbite même, au-dessus de l'eau. C'est sur cette espèce de grille qu'on pose les plantes aromatiques dont on veut obtenir les eaux distillées. La vapeur de l'eau bouillante passant, par exemple, à travers une couche de fleur d'oranger volatilise l'huile essentielle, et va se condenser avec elle dans le serpentin; c'est l'eau chargée ainsi de l'odeur qui prend le nom d'eau de fleur d'orange.

Disparition de chaleur pendant la vaporisation.

996. Avec un appareil distillatoire on peut aisément constater deux faits capitaux dans l'étude de la chaleur. A partir du moment où l'eau est à 100°, le charbon qu'on brûle pendant des heures entières n'élève pas sa température d'un seul degré. Toute la chaleur qu'on lui donne est absorbée pour changer son état, car la vapeur est à 100° comme le liquide. Mais l'énorme quantité d'eau qu'il faut employer et continuellement renouveler pour maintenir le serpentin froid montre que la chaleur reparaît quand la vapeur se liquéfie; nous verrons dans la mesure de la chaleur que 10 livres de vapeur d'eau à 100° peuvent, en se condensant, porter à cette même température plus de 50 livres d'eau froide.

Réapparition pendant la liquéfaction.

Vaporisation dans le vide.

997. Il est évident que quand l'ébullition dure depuis quelque temps l'air se trouve chassé de l'alambic, d'où l'on peut conclure que l'air n'est pas nécessaire à la formation de la vapeur. Autrefois on le croyait l'agent essentiel de la

vaporisation, du moins dans les circonstances ordinaires, c'est-à-dire quand on n'employait pas la chaleur artificielle; mais il est facile de prouver que l'eau et à plus forte raison l'alcool, l'éther, etc., se vaporisent dans le vide le plus parfait et par la température la plus basse. Si on souffle avec un tube recourbé une goutte d'éther dans un baromètre à cuvette, on verra le liquide monter et disparaître en se vaporisant dès qu'il arrivera dans le vide. La vapeur, comme un véritable gaz, déprimera le mercure de quelques millimètres, en vertu de sa force électrique. C'est à cela surtout qu'on reconnaîtra sa présence, car elle est invisible et transparente comme l'air.

998. Dans cette expérience on est frappé de la rapidité de la vaporisation; mais on conçoit le fait en observant que les premières molécules de vapeur doivent s'élancer dans le vide avec la même vitesse à peu près que l'air quand il y pénètre. Or, nous avons vu que cette vitesse était comparable à celle d'un boulet de canon (580); mais ce phénomène est encore plus remarquable quand on opère dans un espace un peu grand, par exemple, dans un ballon où on a fait le vide. On remplit d'éther l'intervalle compris entre deux robinets, et quand on ouvre celui qui donne dans le ballon on voit le liquide, entraîné par la vapeur, se projeter avec violence dans le vide, en produisant un souffle très fort, puis disparaître au même instant. **Rapidité de la vaporisation.**

999. Si la chambre barométrique est un peu grande, une seconde et une troisième goutte pourront encore aussi disparaître, la vapeur alors deviendra plus dense et aura une force plus grande, car le mercure sera plus déprimé. Mais il arrivera un moment où le liquide injecté ne se vaporisera plus; il s'amassera au-dessus du mercure, qui ne baissera dès lors que d'une quantité insensible, et seulement à cause du poids de la petite colonne superposée. Il est évident, d'après cela, que dans un espace donné il ne peut exister qu'une quantité déterminée de vapeur qui, dans ce cas, atteint sa plus grande force élastique; on dit alors que l'espace est *saturé*, de sorte que la *saturation de l'espace* et la *force maximum* de la vapeur sont deux **Saturation de l'espace.** **Force maximum de la vapeur.**

choses qui ont toujours lieu ensemble, et qui peuvent se reconnaître l'une par l'autre.

Force maximum de différents liquides.

1000. En répétant l'expérience sur différents liquides à la même température, on reconnaît qu'il en faut des quantités différentes pour saturer le même espace, et que la force maximum n'est pas la même. Ainsi, il se vaporise moins d'alcool que d'éther, et moins d'eau que d'alcool; l'éther produit une dépression de 15 à 20 centimètres quand celle de l'eau n'est que de quelques millimètres, et que celle de l'acide sulfurique est à peine visible.

Force maximum à différentes températures.

1001. Jusqu'à présent nous avons supposé la température invariable, mais si on opère par un temps très chaud, on trouvera que chaque liquide se vaporise en bien plus grande quantité, et atteint une force maximum beaucoup plus grande. Il suffit, pour reconnaître l'influence de la chaleur, de brûler un peu de papier autour du tube barométrique; on voit alors le mercure, qui était stationnaire, descendre rapidement en même temps que le liquide placé au-dessus diminue.

Cas où la vapeur se comporte comme un gaz.

1002. *Tant que l'espace n'est pas saturé*, la vapeur d'un liquide quelconque se comporte exactement comme un gaz dans les changements de volume dus aux changements de pression ou de température; l'analogie, en effet, est devenue complète après la liquéfaction du gaz. Mais on peut établir le fait directement en opérant dans l'appareil de *Dalton* (509) sur de la vapeur d'éther, par exemple. Soit qu'on la comprime, soit qu'on la dilate, elle suit la loi de *Mariotte*, du moins quand on ne se rapproche pas trop du point de saturation. Si l'on met dans l'appareil de l'air soumis à la même pression, on reconnaît que les changemens de volume sont les mêmes quand on fait varier la température, de sorte que le coefficient de la dilatation des gaz peut s'appliquer aux vapeurs.

Effets de la pression quand l'espace est saturé.

1003. Pour étudier l'effet de la pression sur la vapeur, quand elle sature l'espace, on fait passer un excès de liquide dans l'appareil de Dalton; alors on voit, en plongeant ou en relevant le tube, que la colonne de mercure soulevée est toujours la même, d'où l'on conclut (510) que la force de

la vapeur est toujours la même aussi. Nous supposons qu'on évite toute variation de température, et que dans toutes les positions du tube l'espace reste saturé, ce qui a nécessairement lieu tant que la vapeur reste en contact avec son liquide. L'effet de la pression, quand on enfonce le tube d'un centimètre, est donc de liquéfier un centimètre de vapeur (516); la force, du reste, n'est nullement augmentée, comme cela arrive quand on fait cette expérience sur l'air. Si on élève le tube, une nouvelle quantité de liquide se vaporise, de sorte que la densité se trouve la même, quoique l'espace soit devenu plus grand.

1004. Lorsqu'on échauffe le tube, en maintenant toujours la saturation, la vapeur prend une force incomparablement plus grande que celle qu'on calculerait par le coefficient de dilatation des gaz. Cela vient de ce que la densité augmente par la vaporisation d'une nouvelle quantité de liquide. Par contre, si on abaisse la température, la force diminue bien plus que dans les gaz, parce que ce refroidissement, au lieu d'augmenter la densité la diminue, une partie de la vapeur repassant à l'état liquide. Effets de la température.

1005. Un fait bien remarquable, c'est qu'il suffit de refroidir une portion de l'espace qui contient la vapeur pour qu'elle se réduise en un instant à la force élastique qu'elle aurait si on avait refroidi la totalité. Ainsi, pour l'équilibre, la force élastique doit être partout la même, et ne peut surpasser celle qui convient à la température minimum. Watt a fait, comme nous le verrons, une application capitale de ce principe dans les machines à vapeur. Notons encore ici, que la densité doit varier d'un point à l'autre, précisément parce que la tension est uniforme malgré la différence de température. Remarques.

1006. On doit à M. *Dumas* un procédé général pour déterminer la densité des vapeurs; prenons le mercure pour exemple. On en mettra un peu dans un ballon de verre, c'est-à-dire plus qu'il n'en faut pour le remplir de vapeur à saturation; on assujettira le ballon dans un bain de métal fondu dont on élèvera la température à 400° environ. En se vaporisant, le mercure chassera l'air et sortira lui-même Densité de vapeurs. Procédé de Dumas. Fig. 309.

en partie, de sorte qu'au bout d'un certain temps il ne restera que de la vapeur. C'est alors qu'on fermera le ballon en fondant le col qu'on aura eu la précaution d'effiler en pointe. La température à cet instant sera donnée par un thermomètre à air plongé dans le bain métallique. Du poids du ballon plein retranchant le poids du verre, on aura le poids d'un volume déterminé de vapeur, puisque le ballon peut être jaugé. La température de cette vapeur au moment où elle remplissait le ballon sera connue, puisqu'elle est celle du bain métallique. Sa force élastique était égale à celle de l'air au moment où on a fermé; on la connaîtra donc par la hauteur du baromètre. Calculant ensuite le poids de l'air capable de remplir le ballon dans les mêmes circonstances de pression et de température, il ne restera plus, pour avoir la densité, qu'à diviser le poids de la vapeur par le poids de l'air.

Observations. 1007. La pesée du ballon plein doit être nécessairement ramenée au vide (489); il est également indispensable de s'assurer qu'il ne reste pas d'air avec la vapeur dans le ballon. Cela se fait en cassant la pointe plongée dans l'eau; s'il n'y a pas d'air, l'eau s'élance, et remplit toute la capacité; s'il en reste une bulle, il faudra en tenir compte pour corriger le volume de la vapeur et sa force élastique. Il est d'ailleurs nécessaire de répéter plusieurs fois l'expérience pour bien s'assurer par la concordance des résultats que toute la substance introduite était transformée en vapeur.

Procédé de Gay-Lussac. Fig. 310. 1008. Pour les liquides qui se volatilisent aisément, comme l'eau, l'alcool, l'éther, M. Gay-Lussac a imaginé un procédé plus facile. On enferme le liquide dans une petite ampoule de verre qu'on fait passer sous une cloche graduée pleine de mercure. Cette cloche est entourée d'un manchon de verre contenant de l'eau qu'on porte à l'ébullition. Bientôt l'ampoule crève, et la vapeur déprime le mercure. On a eu soin de prendre une ampoule assez petite pour que l'espace ne soit pas saturé. Cela se reconnaît à ce que la force de la vapeur mesurée par la dépression est moindre que la force maximum donnée par les tables pour la température où l'on opère (1018). De cette manière on

est sûr qu'il ne reste rien à vaporiser, et que le poids du liquide que renfermait l'ampoule est précisément le poids de la vapeur ; son volume est d'ailleurs connu par la graduation de la cloche corrigée de la dilatation du verre. Calculant ensuite le poids d'un pareil volume d'air dans les mêmes circonstances de pression et de température, on a la densité par le rapport des poids. La vis *V* sert à prendre le niveau d'où l'on doit compter la hauteur.

1009. *Densité des vapeurs, celle de l'air etant 1°*

Iodide de mercure	16,2
Iodide d'arsenic	16,1
Acide arsénieux	13,85
Broncíde de mercure	12,16
Arsenic	10,65
Bromure de mercure	10,11
Sublimé corrosif	9,8
Bichlorure d'étain	9,199
Iode	8,716
Chlorure d'antimoine	7,8
Calomel	6,35
Mercure	6,976
Soufre	6,617
Cinabre	5,95
Brome	5,54
Camphre	5,488
Essence de térébenthine	4,763
Phosphore	4,355
Acide acétique	3,067
Acide sulfurique anhydre	3
Sulfure de carbone	2,644
Éther sulfurique	2,586
Éther hydrochlorique	2,212
Acide hyponitrique	1,72
Alcool	1,6133
Acide hydrocyanique	0,9476
Eau	0,6235

Poids spécifique des vapeurs.

1010. Tant que les vapeurs se comportent comme le gaz (1002), leur densité par rapport à l'air ne change pas; de sorte qu'on calcule aisément le poids d'un volume donné pour une température et pour une pression déterminée. Si je veux, par exemple, le poids p d'un litre de vapeur d'eau à t degrés sous la pression h millimètres, je cherche le poids d'un litre d'air supposé dans les mêmes circonstances, (943) et j'en prends les 0,6235 ou les $\frac{5}{8}$ par approximation: j'ai ainsi en grammes

Poids d'un litre de vapeur d'eau.

$$\frac{5}{8} \times \frac{\dfrac{1^{gr}3 \times h}{760}}{1 + \dfrac{t}{267}} \text{ ou } \frac{284\,h}{267 \times t} \text{ en milligrammes.}$$

On trouve ainsi qu'à 100° sous la pression 760^{mm} un litre de vapeur d'eau pèse 0^{gr}, 589. A chaque température la densité de la vapeur a une valeur *maximum*, de sorte que dans la formule on ne peut pas supposer plus grand que la force *maximum* de la vapeur à la température que l'on considère (1018).

Densité calculée.

1011. Si, au poids d'un litre d'hydrogène, on ajoute celui d'un demi-litre d'oxigène, les deux gaz étant à 100° sous la pression 760^{mm}, on tombe à très peu près sur le poids d'un litre de vapeur d'eau supposée dans les mêmes circonstances. Or, la chimie démontre que l'eau est en effet formée de ces deux gaz dans le rapport de 2 à 1 en volume; on peut donc conclure que la densité de la vapeur d'eau est égale à celle de l'hydrogène, plus la moitié de celle de l'oxigène, ce qui donne le nombre 0,6201. Par des considérations analogues empruntées à la chimie, on détermine la densité de la vapeur de plusieurs autres substances, et on peut arriver ainsi à de résultats très exacts: 1° parce que les densités des gaz dont on fait usage dans le calcul sont connues avec beaucoup de précision; 2° parce que les gaz se combinent dans des rapports simples en volume, et par cela même faciles à connaître; 3° enfin, parce que la densité ainsi calculée est celle de la vapeur considérée

vraiment comme un gaz, tandis que la densité trouvée par expérience est en général trop près du point de saturation pour qu'on puisse lui appliquer avec sécurité la loi de Mariotte et le coefficient de la dilatation des gaz. Les gaz ne différant pas réellement des vapeurs, on conçoit qu'on a pu calculer de même la densité de plusieurs d'entre eux à l'aide de considérations chimiques.

Rapport entre les volumes du liquide et de la vapeur.

1012. La vapeur une fois formée se dilatant indéfiniment comme un gaz quand on l'échauffe et qu'on lui présente un espace libre, on conçoit qu'il n'y a pas de rapport déterminé entre son volume et celui du liquide qui lui a donné naissance; mais si on fixe la température et la pression, le rapport se détermine. Par exemple, il résulte des expériences de Gay-Lussac qu'à 100° sous la pression de 760^{mm}, la vapeur occupe un espace 1698 fois aussi grand que l'eau d'où elle provient, en supposant celle-ci au maximum de densité; en sorte qu'un gramme d'eau ou un centimètre cube donne, dans les circonstances indiquées, $1^l,698$ de vapeur.

En effet, pour avoir en litres le volume V d'un gramme de vapeur, il n'y a qu'à chercher combien de fois le poids d'un litre (1010) est contenu dans 1^{gr} (136) on a ainsi

$$V = \frac{1}{0,589} = 1^l,698.$$

Condensation remarquable des vapeurs.

1013. Puisque dans le même espace il se vaporise une quantité de liquide de plus en plus grande à mesure qu'on élève la température, on conçoit qu'on puisse augmenter ainsi presque indéfiniment la densité de la vapeur. En effet, M. Cagniard Latour est parvenu à vaporiser complétement l'éther dans un espace seulement double de celui qu'occupait le liquide; la température était de 200° et la force élastique de 37 atmosphères. L'eau a été vaporisée dans un espace quadruple de celui qui la contenait à l'état liquide, de sorte que la vapeur avait une densité 165 fois aussi grande que celle de l'air. La température était alors de 400° environ. Ces expériences se faisaient dans des tubes de verre très épais qui se brisaient souvent par une violente explosion.

CHAPITRE IV.

FORCE DES VAPEURS.

§ 1er. *Mesure de la force maximum des vapeurs.*

Force remarquable de la vapeur.

1014. La force élastique des vapeurs est un ressort extrêmement puissant, dont on observe à chaque instant les effets, soit dans les arts, soit dans la nature. Nous étudierons particulièrement cette force sur l'eau, et, afin de donner une idée de ce qu'elle peut être, nous dirons d'avance qu'à 266°, température où le ressort de l'air ordinaire n'est pas même doublé, celui de la vapeur est capable de soulever une colonne d'eau de plus de 500 mètres; et cette force peut se développer dans une quantité de liquide presque impondérable.

Procédé pour mesurer la force maximum.

1015. Nous avons déjà vu qu'il y a pour chaque température une force maximum de la vapeur (999); donnons d'abord une idée des procédés qui ont servi à la mesurer.

1° Au-dessous de zéro. Fig. 311.

Pour avoir la force de la vapeur à zéro et au-dessous, M. Gay-Lussac s'est servi de deux baromètres à cuvette, dont l'un, recourbé par sa partie supérieure, s'engageait dans un vase où l'on produisait un froid artificiel avec un mélange de sel et de glace. C'était dans ce baromètre qu'on introduisait l'eau. La vapeur, à mesure qu'elle se formait, allait se congeler dans la partie froide, de sorte qu'au bout de quelque temps il ne restait plus de liquide au-dessus du mercure. Mais la chambre barométrique n'en demeurait pas moins pleine de vapeur; car au moyen de l'autre baromètre on constatait une dépression qui mesurait évidemment la force de la vapeur (610) *à la température du mélange frigorifique*, puisqu'il fallait nécessairement pour l'équilibre que la vapeur eût la même force partout (1005). On a reconnu ainsi qu'à 20° au-dessus de zéro, la

vapeur avait encore une force élastique de plus d'un millimètre. Laissant ensuite le mélange s'échauffer, on a vu la dépression augmenter rapidement, ce qui prouve que la glace, même au-dessous de zéro, émet de la vapeur, dont on a pu ainsi mesurer la force de degré en degré. A zéro on avait déjà une dépression de 5 ^{mm}; elle restait la même, que l'eau fût liquide ou à l'état de glace.

2°. Entre zéro et 100°. Fig. 312.

1016. Pour avoir la force de la vapeur aux degrés compris entre o et 100, on s'est servi également de deux baromètres, dans l'un desquels on avait introduit assez d'eau pour qu'il en restât à vaporiser même à 100°; comme cela on était sûr d'avoir toujours la tension maximum. La cuvette était une petite chaudière en fonte contenant du mercure; un manchon ou large tube de verre ouvert par les deux bouts enveloppait les deux tubes; il les dépassait à la partie supérieure et plongeait assez dans le mercure pour que l'eau dont on le remplissait pût y rester. La chaudière étant placée sur un fourneau, l'eau passait par tous les degrés entre o et 100°; on voyait à travers le liquide la différence de niveau entre les deux baromètres, et cette différence, ramenée à la température de zéro (954), mesurait la force de la vapeur pour la température où l'on faisait l'observation. Cette température était indiquée par des thermomètres plongés dans l'eau du manchon, où l'on avait soin de répartir uniformément la chaleur en agitant le liquide. A 100°, la différence des deux baromètres était précisément d'une atmosphère ou de 760^{mm}.

3°. Au-dessus de 100°. Fig. 313.

1017. C'est à M. Dulong que l'on doit les meilleures mesures de la force de la vapeur au-delà de 100°. Ces mesures, qui offrent tant d'importance à cause des machines à vapeur, présentaient des difficultés dont on ne se fait guère d'idée qu'en lisant le mémoire même; mais on peut aisément concevoir le procédé en imaginant une petite chaudière C parfaitement fermée, où l'on porte l'eau à telle température que l'on veut; chaque degré est indiqué par un thermomètre *t*, et la force de la vapeur est mesurée par un manomètre *m*.

1018. *Force de la vapeur d'eau entre -20° et 100°.*

TEMPÉRATURE.	TENSION.	TEMPÉRATURE.	TENSION.	TEMPÉRATURE.	TENSION.	TEMPÉRATURE.	TENSION.
—20	1,333	11	10,074	42	58,792	73	261,43
—19	1,429	12	10,707	43	61,958	74	273,03
—18	1,531	13	11,378	44	65,627	75	285,07
—17	1,638	14	12,087	45	68,751	76	297,57
—16	1,755	15	12,837	46	72,393	77	310,49
—15	1,879	16	13,630	47	76,205	78	323,89
—14	2,011	17	14,468	48	80,195	79	337,76
—13	2,152	18	15,353	49	84,370	80	352,08
—12	2,302	19	16,288	50	88,742	81	367,00
—11	2,461	20	17,314	51	93,301	82	382,38
—10	2,631	21	18,317	52	98,075	83	398,28
— 9	3,812	22	19,417	53	103,06	84	414,73
— 8	3,005	23	20,577	54	108,27	85	431,71
— 7	3,210	24	21,805	55	113,71	86	449,26
— 6	3,428	25	23,090	56	119,39	87	467,38
— 5	3,660	26	24,452	57	125,31	88	486,09
— 4	3,907	27	25,881	58	131,50	89	505,38
— 3	4,170	28	27,390	59	137,94	90	525,28
— 2	4,448	29	29,045	60	144,66	91	545,80
— 1	4,745	30	30,643	61	151,70	92	566,95
0	5,059	31	32,410	62	158,96	93	588,74
1	5,393	32	34,261	63	166,56	94	611,18
2	5,748	33	36,188	64	174,47	95	634,27
3	6,123	34	38,254	65	182,71	96	658,05
4	6,523	35	40,404	66	191,27	97	682,59
5	6,747	36	42,743	67	200,18	78	707,63
6	7,396	37	45,038	68	209,44	99	733,46
7	7,871	38	47,579	69	219,06	100	760,00
8	8,375	39	50,147	70	229,07		
9	8,909	40	52,998	71	239,45		
10	9,475	41	55,772	72	250,23		

1019. *Force de la vapeur d'eau entre 100° et 266°.*

ÉLASTICITÉ de la vapeur en prenant la pression de l'atmosphère pour unité.	COLONNE de mercure à 0°, qui mesure l'élasticité.	TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré.
1	0m.7600	100°	1k.033
1 1/2	1 .1400	112.2	1 .549
2	1 .5200	121.4	2 .066
2 1/2	1 .9000	128.8	2 .582
3	2 .2800	135.1	3 .099
3 1/2	2 .66	140.6	3 .615
4	3 .04	145.4	4 .132
4 1/2	3 .42	149.06	4 .648
5	3 .80	153.08	5 .165
5 1/2	4 .18	153.8	5 .681
6	4 .56	160.2	6 .198
6 1/2	4 .94	163.48	6 .714
7	5 .32	166.5	7 .231
7 1/2	5 .70	169.37	7 .747
8	6 .08	172.1	8 .264
9	6 .84	177.1	9 .297
10	7 .60	181.6	10 .33
11	8 .36	186.03	11 .363
12	9 .12	190.0	12 .396
13	9 .88	193.7	13 .429
14	10 .64	197.19	14 .462
15	11 .40	200.48	15 .495
16	12 .16	203.60	16 .528
17	12 .92	206.57	17 .561
18	13 .68	209.4	18 .594
19	14 .44	212.1	19 .627
20	15 .20	214.7	20 .660
21	15 .96	217.2	21 .693
22	16 .72	219.6	22 .726
23	17 .48	221.9	23 .759
24	18 .24	224.2	24 .792
25	19 .00	226.3	25 .825
30	22 .80	236.2	30 .990
35	26 .60	244.85	36 .155
40	30 .40	252.55	41 .320
45	34 .20	259.52	56 .485
50	38 .00	265.89	51 .650

Remarque sur la construction des tables.

1020. Il ne faut pas s'imaginer que pour construire ces tables on se soit astreint à mesurer la force précisément de degré en degré ou par nombre exact d'atmosphères; cela serait inexécutable. On a pris un certain nombre de mesures à des températures quelconques, mais assez rapprochées les unes des autres; ensuite par des tâtonnements que l'habitude du calcul apprend à faire, on a construit des formules qui représentaient les observations et qui devaient par conséquent donner des nombres très sensiblement exacts pour les cas intermédiaires, et même à une certaine distance au-delà des cas observés. Ces formules d'*interpolation* sont d'un emploi général en physique; ici, par exemple, les températures qui correspondent aux tensions de 1 à 4 atmosphères inclusivement, ont été calculées par une formule due à *Tredgold*, qui dans cette partie de l'échelle s'accorde mieux que tout autre avec les observations. Plus loin on s'est servi d'une autre formule qui représente si bien les nombres trouvés par expérience qu'on peut l'étendre sans craindre d'erreur notable jusqu'à 50 atmosphères. Les mesures ont été prises réellement jusqu'à 24 atmosphères, c'est-à-dire jusqu'à la température de 224°,2.

Formules d'interpolation.

Force de la vapeur des liquides autres que l'eau.
Loi de Dalton.

1021. On n'a pas de tables pour les autres vapeurs, mais on calcule approximativement leur force par la loi de Dalton; d'après cette loi *si les forces de deux vapeurs sont égales, elles le seront encore quand les températures varieront d'un même nombre de degrés.* Ainsi les vapeurs d'eau et d'alcool ayant la même force l'une à 100° et l'autre à 79°, il y aura encore égalité à 110° et 89°, à 90° et 69°, etc. Prenant donc dans les tables la force de la vapeur d'eau à 90°, on aura celle de l'alcool à 69. Ainsi, pour appliquer la loi, tout se réduit à trouver deux températures où les forces soient égales, et on y parvient directement en introduisant le liquide proposé dans le tube barométrique; si à 15° on trouve une dépression de 23mm,1, on saura par la table que la force est la même que celle de l'eau à 25°, et on aura ainsi les deux points de départ. Mais les forces des vapeurs étant égales pour tous les liquides en ébullition, ainsi que nous le verrons, la table des points d'ébullition (1029) donne immédia-

tement des points de départ pour les différents liquides. Ordinairement même on énonce la loi en disant que les *tensions sont égales à distances égales des points d'ébullition.* La loi de Dalton devient inexacte quand on s'éloigne trop des points de départ.

1022. Lorsqu'on mêle plusieurs vapeurs, la force totale est la somme des forces partielles, pourvu qu'il n'y ait pas d'action chimique. Ainsi la tension de l'alcool faible est la somme des tensions de l'alcool absolu et de l'eau. **Force des vapeurs mêlées.**

§ II. *Phénomène de l'ébullition.*

1023. Nous examinerons maintenant les effets que produit la force des vapeurs, et en premier lieu le phénomène si remarquable de l'*ébullition.* Si nous étudions ce phénomène dans un vase de verre rempli d'eau et posé sur le feu, nous verrons d'abord l'air dissous dans le liquide reprendre l'état de gaz en formant une infinité de bulles qui naissent surtout contre les parois auxquelles la chaleur est appliquée, puis s'élèvent à travers la masse en grossissant. Peu à peu ce dégagement d'air diminue quoique la température s'élève; il semble ensuite reprendre avec plus de force; mais alors les bulles se liquéfient en traversant le liquide, d'où l'on peut conclure qu'elles sont formées par de la vapeur et non plus par de l'air. Ces petites condensations successives qui ont lieu près du fond occasionnent un bruit particulier résultant de la vibration du liquide et du vase; c'est ce qui constitue le *frémissement.* Mais bientôt le liquide est assez échauffé pour que les bulles puissent le traverser sans s'y dissoudre, elles peuvent même s'y former à différentes hauteurs. On voit d'après cela que l'*ébullition* consiste dans la formation de la vapeur au sein même du liquide. **Phénomène de l'ébullition. Frémissement.**

1024. On croit généralement qu'il faut une haute température pour faire bouillir de l'eau, mais réellement la seule condition nécessaire est que la force de la vapeur soit plus grande que la pression supportée par le liquide, et il est évident qu'on remplit cette condition tout aussi bien en diminuant la pression qu'en élevant la température. Ainsi, **Condition de l'ébullition.**

dans les circonstances ordinaires, la pression étant de $0^m,76$, il faut une température de 100°; mais il est évident que, si on opère dans le vide, la température ordinaire suffira; et il est facile de voir par la table des forces élastiques que l'eau même à zéro doit se mettre à bouillir dès que le vide est fait à 3 ou 4 millimètres. L'ébullition s'arrête quand on cesse de pomper, parce que l'espace se trouve bientôt saturé de vapeur dont la pression s'oppose à la formation des bulles.

Autre manière de faire l'expérience. Fig. 314.

1025. On peut répéter l'expérience sans machine pneumatique et simplement avec un ballon à moitié plein d'eau qu'on a fait bouillir pour chasser l'air du vase. L'appareil étant bien fermé on produira l'ébullition quand l'eau ne sera plus que tiède en appliquant sur la partie supérieure une éponge imbibée d'eau froide ou mieux encore un morceau de glace, parce qu'on diminuera ainsi la force élastique de la vapeur qui est au-dessus du liquide; et même le refroidissement qu'occasionne l'air ambiant suffit pour prolonger l'ébullition longtemps après que le vase a été fermé.

Bouillant de Franklin. Fig. 315.

1026. On appelle *bouillant de Franklin* un petit appareil en verre, ordinairement composé de deux boules réunies par un tube recourbé, l'instrument est à moitié plein d'éther ou d'alcool qu'on a fait bouillir pour chasser l'air. Quand avec la main on échauffe une des boules, la vapeur dilatée pousse le liquide dans l'autre, puis passe à travers lui sous forme de bulles bientôt condensées par le refroidissement, de sorte qu'il s'établit une ébullition qui dure un certain temps.

Tâte-pouls.

Dans le *tâte-pouls* les boules sont réunies par un tube droit; on échauffe avec la main celle qui contient le liquide; il s'y forme de temps en temps une bulle qui se condense dans la partie froide après avoir élevé momentanément le niveau dans le tube; ce niveau présente ainsi des oscillations plus ou moins fréquentes suivant la chaleur de la main. L'expérience réussit mieux quand on incline l'appareil, parce que la pression étant moindre, les bulles se forment plus aisément.

Ébullition dans l'air. Invariabilité de la température.

1027. Nous avons vu en construisant le thermomètre que l'eau soumise à la pression constante de l'air ne s'é-

chauffe plus dès qu'elle a commencé à bouillir; toute la chaleur qu'on ajoute alors ne sert qu'à former la vapeur qui s'échappe en bulles dès qu'elle est formée. On a là un moyen très simple et très précieux de maintenir une température invariable autant de temps qu'on veut.

Détermination des points d'ébullition.

1028. La pression de l'air étant à peu près constante, le *point d'ébullition* d'un liquide dans l'air est à peu près constant aussi, puisque c'est la température ou la force de la vapeur qui surpasse un tant soit peu la pression atmosphérique. Cependant quand on veut déterminer rigoureusement le point d'ébullition, il faut opérer sous la pression normale $0^m,76$. Voici les résultats obtenus ainsi pour les principaux liquides.

1029. *Table des points d'ébullition.*

Acide sulfureux.	— 10°
Éther hydrochlorique.	+ 11
Acide hydrocyanique.	26,5
Acide hyponitrique.	28
Éther sulfurique d = 0,715.	35,5
Sulfure de carbone.	45
Brome.	47
Éther hydriodique.	65
Esprit de bois.	66
Alcool d = 0,793.	78,8
Acide nitrique le plus concentré.	86
Eau pure.	100
Essence de térébenthine d = 0,872.	156,8
Iode.	175
Camphre.	204
Phosphore.	290
Soufre.	300
Acide sulfurique d = 1,84.	310
Huile de lin.	316
Mercure.	350

Détermination approchée.

1030. Lorsqu'on n'a qu'une très petite quantité de liquide,

on peut déterminer approximativement le point d'ébullition par la loi de Dalton (1021). On en fait passer dans un baromètre assez pour qu'il y ait saturation, et si on observe, par exemple, à 20° une dépression de 376^{mm}, on conclut, en consultant la table (1018), qu'on est à 19° au-dessous du poids d'ébullition qui se trouve par conséquent à 39°.

Circonstances qui influent sur le point d'ébullition.

1o Pression de l'air.

1031. La pression de l'air varie en général trop peu pour que dans les circonstances ordinaires on s'aperçoive de son influence sur le point d'ébullition. Mais à de grandes hauteurs, l'air pressant beaucoup moins, les effets sont si marqués qu'on n'a pas besoin d'instrument pour les reconnaître. Ainsi, même avant l'invention du thermomètre, on savait que l'eau bouillante était beaucoup moins chaude sur les hautes montagnes, car certaines substances y cuisent très difficilement. Sur le Mont-Blanc, par exemple, l'eau bout déjà à 84°; et comme dès lors elle ne s'échauffe plus (1027), il faut un temps très long pour y cuire des œufs; la coagulation de l'albumine de l'œuf deviendrait même impossible si le baromètre n'était pas au moins à 0^{m} 27, puisque alors la température n'atteindrait pas 75°.

Ébullition sur les montagnes.

Dans les lieux profonds.

On conçoit qu'au contraire l'eau bouillante doive être plus chaude dans des lieux très profonds; on voit par la table des forces élastiques que si on faisait bouillir de l'eau sous une cloche de plongeur à la profondeur de 32 pieds, sa température serait de 122° environ.

2o Pression du liquide.

1032. Plusieurs circonstances influent encore sur le point d'ébullition, et on doit y avoir égard lorsqu'on veut déterminer ce point avec exactitude. Ainsi, dans un vase profond, la pression due au liquide peut être assez considérable pour retarder sensiblement l'ébullition. Il faut donc prendre le liquide en couche assez mince pour que sa pression puisse être négligée, ou bien plonger le thermomètre seulement dans la couche supérieure.

3o Nature du vase.

1033. La nature du vase a une influence très notable; ainsi l'eau qui bout à 100° dans un vase de métal, peut avoir près du fond une température de 101°, dans des vases de terre ou de verre. En outre, dans les vases de verre dont le fond est uni et régulier, comme il n'y a pas de raison

pour que l'ébullition commence par un point plutôt que par l'autre, il se forme à de longs intervalles une large bulle sur tout le fond à la fois, d'où résulte un soulèvement général du liquide qui retombe ensuite brusquement. Ces *soubresauts* sont très marqués pendant la distillation de l'acide sulfurique dans des cornues de verre dont ils occasionnent souvent la fracture. On les prévient en mettant quelques corps irréguliers dans le liquide, comme des fragments de verre ou quelques morceaux de platine; les bulles alors prennent naissance sur les aspérités et s'élèvent d'une manière continue. Le zinc et le fer, dans les liquides où on peut les employer, réussissent encore mieux que le platine.

1034. Les substances qui ont une action chimique sur le liquide changent notablement son point d'ébullition. Ainsi l'alcool du commerce, à cause de l'eau qu'il contient, exige une température d'au moins 80°; il faut bien 40° pour l'éther ordinaire. Mais l'action des sels est surtout remarquable comme on le voit par le tableau suivant dû à M. Legrand. 4° Pureté du liquide.

Point d'ébullition de l'eau saturée de

Sulfate de soude.	100°,7
Acétate de plomb.	102
Chlorate de potasse.	104 ,2
Chlorure de barium.	104°,4
Carbonate de soude.	104 ,6
Chlorure de potassium.	108 ,3
Chlorure de sodium.	108 ,4
Hydrochlorate d'ammoniaque.	114 ,2
Tartrate neutre de potasse.	114 ,67
Nitrate de potasse.	115 ,9
Chlorure de strontium.	117 ,9
Nitrate de soude.	121
Carbonate de potasse.	135
Nitrate de chaux.	151
Chlorure de calcium.	179 ,5
Nitrate d'ammoniaque.	180

Applications. 1035. On utilise cette action des sels pour obtenir dans certains cas une température constante et supérieure à 100°. Par exemple, on introduit du sel marin dans l'alambic pour la distillation de l'eau de fleur d'orange, l'opération marche bien plus vite à la température d'environ 108° qu'on obtient alors.

Les sels diminuent la densité et la force de la vapeur. 1036. L'ébullition des dissolutions citées dans le tableau se faisant à l'air libre, la force de la vapeur ne surpassait pas une atmosphère, quoique la température fût bien supérieure. Par exemple, avec le carbonate de potasse, au lieu de 3 atmosphères qu'on aurait pu avoir à 135°, on n'en avait qu'une. Cependant la vapeur d'eau était pure puisque ce sel n'est pas volatil, et c'était de la vapeur à saturation puisqu'elle était en contact avec son liquide. Une force si petite à une aussi haute température montre évidemment une densité très faible, et on conclut qu'un sel en liquéfiant une portion de la vapeur par son affinité, fournit un moyen d'en diminuer la force sans changer le volume ni la température.

Point d'ébullition trouvé par le baromètre. 1037. Avec une table des forces de la vapeur et un baromètre, on peut trouver le point d'ébullition sans thermomètre, ce qui permet de marquer exactement le point 100° quand on construit cet instrument (842), sans attendre que la pression soit réellement de $0^m,76$. Si par exemple le baromètre marque $0^m,733$, la température n'est que de 99° (1018). Ayant ce point et celui de la glace fondante, on divisera l'intervalle en 99 parties, et une de ces parties, portée au-dessus de 99°, donnera le point 100°. Si le baromètre marquait 750^{mm}, on observerait qu'une différence de 27^{mm} répond à 1°, et que par conséquent les 10^{mm} de différence répondent sensiblement à 0°,37; c'est-à-dire que la vraie température est 99°,63. L'intervalle au zéro serait divisé en 9963 parties; 37 de ces parties, prises en sus, donneraient le produit 100°. A Paris, les hauteurs extrêmes du baromètre étant 719^{mm} et 781^{mm}, on voit que les températures extrêmes de l'ébullition sont 98°,5 et 100°,8.

Détermination exacte du point 100° des thermomètres.

Hauteur barométrique trouvée par le point d'ébullition. 1038. Réciproquement, en prenant le point d'ébullition avec un thermomètre très sensible, on trouve la hauteur

du baromètre par la table des tensions, et cela fournit le moyen de mesurer la hauteur des montagnes avec le thermomètre; puisque deux observations thermométriques faites ainsi, l'une au pied, l'autre au sommet, peuvent être ainsi converties en observations barométriques; mais ce procédé ne vaut pas le procédé direct. Mesure des montagnes par le thermomètre.

1039. Un physicien français nommé *Papin* eut le premier l'idée de chauffer l'eau sans lui permettre de bouillir. Son appareil consistait en un vase de cuivre très épais, dont le couvercle était maintenu par la pression d'une forte vis, et présentait une soupape de sûreté. La température de l'eau, dans ce vase fermé, n'est plus bornée à 100°, elle s'élève indéfiniment; l'étain, le plomb peuvent s'y fondre. Si on y met des os, le liquide en peu d'instants se trouve chargé de gélatine: les os sont alors blancs et friables comme s'ils avaient été calcinés. Si on ouvre la soupape quand la température est très élevée, la vapeur s'échappe avec une violence et un bruit extraordinaires, et le liquide retombe à 100°; mais quelquefois il se vaporise entièrement et le vase reste sec. Digesteur de Papin. Fig. 316.

1040. On a voulu, dans ces derniers temps, employer la marmite de Papin à la préparation des aliments ; et il est certain que la cuisson des viandes s'y fait incomparablement plus vite, et tout aussi bien que dans une marmite ordinaire; mais il y a eu des explosions qui ont fait renoncer à cet emploi. L'appareil portait le nom de marmite *autoclave*, parce qu'il se fermait de lui-même, et d'autant mieux que la vapeur faisait plus d'efforts pour sortir. Dans l'ouverture *a b* qui était elliptique, on introduisait un couvercle A B, de même forme, mais plus large, en présentant le plus petit diamètre au plus grand. Une fois introduit, ce couvercle était retourné, et la vapeur, en le pressant contre l'ouverture, se fermait elle-même le passage. Marmite autoclave. Fig. 317.

§ III. *Machines à vapeur.*

1041. On trouve dans les anciens cabinets de physique un appareil appelé *éolipyle*, (porte d'Eole), dans lequel on Éolipyle. Fig. 318.

donne à la vapeur une force assez considérable pour produire quelques effets curieux. C'est une espèce de poire creuse en métal, qu'on peut manier par un manche M, et dont la queue T offre un canal très étroit. On y fait entrer de l'eau comme dans les thermomètres, et on la chauffe ensuite fortement quand elle est à moitié pleine. La vapeur sort alors avec violence, de sorte qu'avec son souffle, on peut mettre en mouvement différents appareils, comme on le ferait avec le vent. La vapeur se refroidit tellement en se dilatant dans l'air, qu'elle paraît à peine tiède. En inclinant convenablement l'éolipyle, on a un jet d'eau qui peut s'élancer à 25 pieds. Si, au lieu d'eau, on a mis de l'esprit-de-vin ou de l'eau-de-vie, on peut enflammer le jet; mais il est à remarquer que la flamme ne commence qu'à une certaine distance de l'ouverture, à cause de la trop grande vitesse du liquide dans l'air.

Tourniquet à vapeur.

1042. La vapeur, en s'échappant d'un vase mobile, produit un recul, comme nous l'avons vu pour les liquides et pour l'air (586). Ainsi, le tourniquet à gaz (fig. 232) étant vissé sur la marmite de Papin, tourne rapidement; on produit encore un recul en mettant sur un petit chariot, pendant que la vapeur s'échappe, une espèce d'éolipyle ayant une ouverture fermée par un bouchon. Au-dessous se trouve une lampe, qui, en échauffant l'eau, fait sauter le bouchon par la force de la vapeur, et on voit alors le chariot rouler en reculant.

Chariot à vapeur.

Projectiles lancés par la vapeur.

1043. Un ingénieur anglais, M. Perkins, a construit, il y a quelques années, un appareil pour lancer des projectiles par la force de la vapeur. Une petite chaudière cylindrique en bronze, de 3 pouces d'épaisseur, contenant 36 litres d'eau environ, était chauffée de manière à donner à la vapeur une force de 35 à 40 atmosphères; ce qui équivaut à une pression de 700 livres à peu près par pouce carré. On établissait à volonté une communication avec un canon de fusil, où les balles arrivaient latéralement par une espèce de trémie, de sorte qu'elles étaient lancées d'une manière presque continue (quatre à cinq cents par minute), et avec autant de force que par un fusil ordinaire. En portant la pression à 840 livres par pouce carré, les

balles, en frappant contre une plaque de fonte à 100 pieds de distance, ne s'aplatissaient plus comme auparavant, mais se réduisaient en parcelles qu'on avait peine à retrouver. Quelquefois, dans les canons ordinaires, on voit des effets de la force de la vapeur. Ainsi, quand ils sont très échauffés après plusieurs coups tirés de suite, l'*écouvillon* mouillé qu'on y introduit pour les rafraîchir est violemment repoussé, s'il remplit trop exactement le calibre. *Vauban*, en comparant la force de la vapeur à celle de la poudre, a vu que 140 livres d'eau réduite en vapeur pouvaient soulever une masse de 77 milliers, tandis qu'il fallait près de 260 livres de poudre pour produire le même effet. Il est infiniment probable que la force de la vapeur joue un très grand rôle dans les explosions volcaniques et dans les tremblements de terre; c'est elle évidemment qui, près de l'*Hécla*, en Irlande, lance ces jets immenses d'eau bouillante, connus sous le nom de *Geysers*.

Machines à vapeur proprement dites.

1044. Pour nous faire idée des machines à vapeur proprement dites, considérons un corps de pompe AB, dans lequel peut jouer le piston P. La vapeur, provenant d'une chaudière fermée, entre par le tuyau T dans la *boîte à tiroir* M, et de là par t pénètre dans la partie supérieure du corps de pompe. Si la force de cette vapeur est de plus d'une atmosphère, l'air qui est au-dessous du piston sera refoulé dans la boîte par le tuyau t', et de là chassé au dehors par l'ouverture T′. Si l'instant d'après on lève la tige du *tiroir*, la vapeur changera de route : arrivant toujours par T, elle passera par t' dans la partie inférieure du corps de pompe, et pourra faire remonter le piston, parce que la vapeur qui est au-dessus n'a plus que la force d'une atmosphère, à cause de la communication qui s'établit alors avec l'air extérieur par le tuyau t', le tiroir N et l'ouverture T′. Ainsi, en intervertissant convenablement les communications par le moyen du tiroir ou de tout autre système de robinets ou de soupapes, on fera alternativement monter et descendre le piston avec une force aussi grande qu'on voudra, puisqu'on est maître d'augmenter sa surface et la tension de la vapeur. La tige L, qui est rigide, se

Fig. 320.

trouve de la sorte animée d'un mouvement de *va et vient*, qu'on transforme ordinairement en mouvement de rotation, comme nous le verrons tout à l'heure.

Condenseur de Watt.

1045. Dans certaines machines, le tuyau T', au lieu de s'ouvrir dans l'air, aboutit à un vase vide d'air où jaillit continuellement de l'eau froide. La vapeur, en arrivant dans cet espace, se liquéfie et perd à peu près complétement sa force élastique dans toute son étendue (1005), de sorte qu'il n'y a plus sur le piston qu'une contre-pression très faible.

Machines à basse et à haute pression.

1046. On appelle machines à *basse pression* celles où la force de la vapeur ne dépasse guère une atmosphère ; il leur faut nécessairement un *condenseur*. Dans les machines à *haute pression*, la force de la vapeur va jusqu'à 6 ou 7 atmosphères ; le plus ordinairement elles sont sans *condensation*, de sorte qu'on les reconnaît aux bouffées de vapeur qu'elles lancent à chaque coup de piston dans l'atmosphère. Les machines à basse pression se reconnaissent à l'énorme quantité d'eau chaude qu'elles versent au dehors. Cette eau provient du condenseur où on la renouvelle continuellement, à mesure qu'elle s'échauffe par la vapeur qui s'y liquéfie.

Machines à détente.

1047. Autrefois on laissait arriver la vapeur jusqu'à ce que le piston fût au bout de sa course ; maintenant on en interrompt l'arrivée quand il en a parcouru seulement une partie ; son mouvement s'achève par la vitesse acquise et par la *détente* de la vapeur. En effet, la vapeur introduite est comme un ressort qui se détend à mesure que l'espace augmente, mais qui néanmoins pousse encore le piston avec une certaine force. On admet que la vapeur, en se détendant, suit la loi de Mariotte (1002), de sorte qu'en la supposant d'abord à 5 atmosphères quand le volume était 0,6, on voit par la proportion (514),

$$5 : x :: 1 : 0{,}6,$$

que la force est encore de 3 atmosphères à la fin de la course. La détente se règle avec un robinet gradué, de

sorte qu'on a plus ou moins de force suivant les différents cas.

1048. Le piston, dans les machines à basse pression, se compose de deux plaques circulaires de fonte, entre lesquelles on comprime fortement de la filasse imprégnée de suif. Dans les machines à haute pression, où la température va jusqu'à 170°, le piston est entièrement métallique : d'un côté il présente 3 segments A B C, poussés par des ressorts qui s'appuient contre les coins *a b c*, de sorte qu'ils s'appliquent toujours exactement contre les parois du cylindre ; de l'autre côté il y a un appareil tout semblable, mais les jonctions des segments inférieurs répondent aux pleins des supérieurs, afin que la vapeur ne puisse pas passer, même quand par l'usure les jonctions deviennent imparfaites. Pistons. Fig. 321.

1049. La chaudière qui fournit la vapeur est ordinairement un cylindre en fonte de 2 ou 3 pieds de diamètre sur 15 à 20 pieds de long, terminé par deux hémisphères ; inférieurement elle communique avec deux cylindres plus étroits appelés *bouilleurs*, qui plongent immédiatement dans la flamme du fourneau. En O se trouve une large ouverture ovale qu'on appelle le *trou d'homme*, et par laquelle on descend dans la chaudière pour la nettoyer. Elle se ferme comme la marmite autoclave (1040); T est le tuyau qui donne issue à la vapeur. En S sont les soupapes de sûreté (512) et les rondelles fusibles faites pour se fondre, l'une à 10 et l'autre à 20 degrés, au-dessus de la température à laquelle fonctionne la machine. Chaudière. Fig. 322.

1050. F est le *flotteur* qui règle l'*alimentation*, c'est-à-dire l'introduction de l'eau. C'est ordinairement une pierre équilibrée par un contre-poids P, de manière à plonger en partie; le fil qui la soutient traverse une *boîte à étoupes*, qui ne permet pas la sortie de la vapeur. Ce fil porte un bouchon métallique *b*, qui ferme le tuyau *t* quand le flotteur et par conséquent le niveau se trouvent à la hauteur convenable. Si l'eau vient à manquer, le flotteur baisse, et la partie supérieure du bouchon qui est échancrée laisse un Alimentation continue.

passage libre dans le tuyau d'alimentation. Si la machine est à haute pression, il faut nécessairement que l'eau soit foulée dans ce tuyau par une pompe. La pompe, mise en mouvement par la machine même, marche continuellement; mais quand le passage n'est pas libre en *b*, l'eau retourne dans le réservoir en soulevant une soupape qui présente assez de résistance pour ne pas céder à la vapeur, quand la communication avec la chaudière est ouverte. Mais le plus ordinairement l'alimentation est réglée par un ouvrier qui, de temps en temps, d'après les indications du flotteur, tourne un robinet pour laisser arriver l'eau foulée par la pompe alimentaire.

Alimentation intermittente.

Accessoires.

1051. La chaudière présente encore quelques parties accessoires, comme un manomètre, un tuyau pour porter au dehors l'excès de vapeur. Quelquefois il y a un petit bouilleur où l'eau d'alimentation s'échauffe, afin d'arriver dans la chaudière à la même température que celle qui s'y trouve déjà. G est une soupape à air qui s'ouvrirait par la pression extérieure, s'il se faisait un vide dans la chaudière dont on prévient ainsi la déformation.

Dépôt dans les chaudières.

1052. On a indiqué, comme cause d'explosion, le dépôt qui se forme dans les chaudières. Ce dépôt, dû principalement au carbonate et au sulfate de chaux que les eaux contiennent, constitue souvent une croûte très épaisse qui gêne le passage de la chaleur, de sorte que la fonte doit être portée presque au rouge pour que l'eau en contact avec la couche calcaire s'échauffe suffisamment. Si par hasard le dépôt vient à se briser, le liquide tombe sur la paroi incandescente, d'où résulte le développement subit d'une grande quantité de vapeur. On prévient la formation du dépôt en rendant l'eau visqueuse, et le moyen le plus économique pour cela est d'ajouter une certaine quantité de pommes de terre.

Moyen de le prévenir.

Cause remarquable d'explosion.

1053. Un fait bien remarquable, c'est que l'ouverture d'une soupape peut devenir une cause occasionnelle d'explosion. Lorsque par une alimentation imparfaite l'eau se trouve en trop petite quantité, les parties latérales et supérieures de la chaudière peuvent prendre une tem-

pérature beaucoup plus élevée que celle du liquide. La pression de la vapeur n'est pas plus forte pour cela : elle ne peut être que justement égale à la tension du liquide (1005), de sorte que dès qu'on ouvre la soupape, une ébullition tumultueuse lance de l'eau, comparativement froide, au milieu de la vapeur formée, qui par cela même perd brusquement une partie considérable de sa force élastique, comme l'a fait voir M. Dulong. Alors, l'eau qui est au fond de la chaudière, moins pressée en dessus qu'elle ne l'est en dessous, se trouve projetée en masse contre les parois incandescentes qui peuvent céder à ce choc et à la tension de l'énorme quantité de vapeur formée instantanément au contact. Les parois d'ailleurs sont dans les conditions les plus favorables pour une rupture, à cause des variations brusques et opposées qui viennent d'avoir lieu dans la pression intérieure.

1054. D'après une ordonnance royale, les chaudières sont essayées sous une pression 5 fois aussi forte que celle qu'elles doivent supporter. Pour cet essai, qui se fait à froid, on y comprime de l'eau avec une pompe foulante, après avoir chargé convenablement les soupapes. Essai des chaudières.

1055. Maintenant que nous savons comment la vapeur est produite et alternativement introduite au-dessous et au-dessus du piston, nous pouvons examiner le jeu des pièces qui transmettent et régularisent le mouvement. La tige du piston est articulée à l'extrémité H du *balancier* CC′ qui est un énorme levier du premier genre à bras égaux, de sorte qu'il ne sert qu'à transmettre le mouvement. L'extrémité H décrit un arc de cercle dont le centre est au point d'appui ; mais on conserve la verticalité de la tige du piston au moyen du *parallélogramme articulé* H H′ h h′. Si le balancier tend à incliner la tige à gauche, la barre A H, mobile autour du point A qui est fixe, tend à l'incliner à droite en faisant reculer la charnière H′, de sorte qu'il y a compensation. L'autre bras du balancier, articulé avec la bielle F F′, fait tourner une manivelle N, et le mouvement de va et vient du piston se trouve ainsi changé en un mouvement de rotation. Quand la manivelle est en ligne droite avec

Jeu d'une machine à vapeur. Fig. 323. Balancier. Parallélogramme articulé. Manivelle.

la bielle, le mouvement du balancier ne tend plus à la faire tourner; mais ces positions se trouvent dépassées en vertu de la vitesse acquise, surtout à cause du volant D D, qui fait corps avec l'arbre de couche. A la rigueur le mouvement ne peut pas être uniforme, puisque le balancier passe périodiquement par divers degrés de vitesse; mais avec un volant très lourd on rend tout-à-fait insensibles les variations qui ont lieu pendant chaque révolution.

Volant.

Régulateur à force centrifuge.

1056. Une corde sans fin C C C, mise en mouvement par l'arbre, passe sur les poulies de renvoi p, et fait tourner l'axe P du *régulateur à force centrifuge.* Si la rotation est trop rapide, les boules s'écartent, la couronne b s'abaisse, l'extrémité Q se relève et ferme en partie le robinet R qui règle l'introduction de la vapeur; alors le mouvement du piston se ralentit, et par suite celui de l'arbre.

Jeu du tiroir.

1057. L'engrenage s, qui porte un excentrique, fait monter et descendre la tige T du tiroir; la barre t, qui transmet le mouvement, le reçoit de l'arbre par un engrenage semblable à celui qu'on voit en s. C'est par le tuyau E que la vapeur arrive au tiroir; elle sort par le tube K qui aboutit au condenseur O, où la petite vanne W introduit à chaque instant un jet d'eau froide.

Pompe alimentaire.

1058. Le balancier fait marcher à la fois trois pompes : 1° la pompe alimentaire dont la bielle est articulée en C, et dont on voit le corps en M. Son piston est un long cylindre plein, qui aspire l'eau chaude V provenant du condenseur, et la foule dans la chaudière par le tuyau q, lorsque le robinet r est ouvert; 2° la pompe à air dont la bielle s'étend de C′ en p'; elle aspire tout ce qui se trouve dans le condenseur; le piston monte l'eau chaude dans le vase V qui fournit à l'alimentation, l'excédant s'écoule au dehors; 3° la pompe à eau froide qu'on ne voit pas ici, et dont la bielle est cachée derrière C′; elle amène l'eau d'un puits dans la bâche B B, qui s'ouvre dans le condenseur.

Pompe à air.

Pompe à eau froide.

Systèmes divers.

1059. Le système que nous venons de décrire ne doit être considéré que comme un exemple, car il y en a une infinité d'autres. Ainsi, dans le système de Wolf, il y a deux cylindres dont l'un a une section triple ou quadruple de l'autre; les

deux pistons montent et descendent ensemble, le petit par l'effort direct de la vapeur, le grand par la détente de la vapeur qui, à la course précédente, agissait sur le petit piston. Pour cela il y a des communications croisées et un tiroir à chaque cylindre. Il est évident que si les diamètres étaient égaux, on ne gagnerait rien, puisque la vapeur résisterait autant d'un côté qu'elle pousserait de l'autre. Les deux cylindres sont entourés par une enveloppe commune en fonte qu'on appelle une *chemise*; la vapeur circule dans l'intervalle pour empêcher le refroidissement. Dans les machines dites à *cylindre oscillant*, qui sont aujourd'hui très estimées, le corps de pompe est porté sur des coussinets par deux tourillons latéraux comme une pièce d'artillerie; il s'incline alternativement dans un sens et dans l'autre, de sorte que la tige du piston agit directement sur la manivelle sans l'intermédiaire d'un balancier. La vapeur entre et sort par les tourillons qui sont creux. Il y a aussi des machines à cylindre fixe horizontal ou diversement incliné.

Système de Wolf. Fig. 324.

Cylindre oscillant.

1060. En Angleterre, on emploie avec avantage, comme moyen d'épuisement dans les mines de charbon, une machine à vapeur dont le piston descend par la pression de l'air. Supposons-le au bas du corps de pompe : si on laisse arriver au-dessous de la vapeur à 100° à peu près, il va se trouver également pressé sur les deux faces, et montera pourvu qu'à l'autre bout du balancier, il y ait un contrepoids capable de vaincre les frottements. Quand il est arrivé en haut, une communication s'ouvre entre le corps de pompe et le condenseur. C'est alors comme si on faisait le vide, puisque la vapeur perd sa force; le piston descend donc comme s'il était chargé d'une colonne d'eau ayant sa surface pour base et 10 mètres de hauteur. Cette machine, construite d'abord par Newcomen, porte encore son nom; mais elle a été considérablement perfectionnée par Watt. On l'appelle aussi machine à simple effet, parce qu'il n'y a qu'une des courses du piston qui donne un *effet utile*.

Machine atmosphérique.

1061. Dans quelques établissements de bains, par exemple, aux bains du Pont-Marie, à Paris, on se sert, pour

Machine de Savery. Fig. 325.

élever l'eau, d'une machine à vapeur dite de Savery, qui n'a pas de piston, et dont on peut se faire une idée en imaginant un vase fermé B B, communiquant avec l'eau qu'il s'agit d'élever par un tuyau d'aspiration C C garni d'une soupape *m*. Un tube D O descend au fond du vase; il a une soupape *n* à la partie inférieure. En tournant le robinet *a*, on laisse arriver de la vapeur provenant d'une chaudière : l'air se trouve bientôt chassé par la soupape *n*; alors si on interrompt l'arrivée de la vapeur, celle qui est entrée se liquéfie, et l'eau s'élance dans le vide par le tuyau C C. Quand le vase est plein, on laisse arriver de la vapeur qui, pressant sur l'eau, la fait monter par le tube D D. Cet appareil consomme beaucoup de vapeur à cause de la liquéfaction que l'eau froide occasionne; mais, par cela même, l'eau qu'on élève se trouve déjà échauffée, ce qui rétablit ici l'avantage.

Applications de la machine à vapeur.

1062. La machine atmosphérique et celle de *Savery* ne sont employées que dans des cas assez restreints, mais les applications qu'on fait de la machine à vapeur proprement dite sont vraiment innombrables; nous indiquerons seulement les bateaux à vapeur, les machines locomotives, l'élévation des eaux, l'exploitation des mines, les forges, les filatures, les soieries mécaniques, la fabrication des monnaies, etc. Après les chutes d'eau, c'est certainement la force la plus économique.

Comparaison des machines à haute et à basse pression.

1063. Du reste, pour chaque application on préfère tel ou tel système. Ainsi, pour les bateaux à vapeur, on emploie surtout les machines à basse pression; une des raisons sans doute, c'est qu'on a l'eau de condensation sous la main. Au contraire, sur les voitures on ne peut pas porter avec soi la masse énorme d'eau froide nécessaire à la condensation: il faut des machines sans condenseur et par conséquent à haute pression. Aujourd'hui, du moins en France, ces machines sont généralement préférées dans la plupart des industries, comme plus économiques. La théorie, ainsi que nous le verrons dans la section de la chaleur, indiquait bien qu'il devait en être ainsi; mais il fallait dans l'exécution des pièces une perfection qu'on n'a atteinte que

dans ces derniers temps; encore ne fait-on pas les cylindres très larges, de sorte qu'en général, la force ne dépasse guère 20 ou 30 chevaux. On réussit mieux dans les machines à basse pression, quand il faut une force plus considérable. Il y en a dans les mines de Cornouailles qui ont la force de plusieurs centaines de chevaux. D'ailleurs, en Angleterre la basse pression prévaut encore, à cause d'un grand nombre d'excellentes machines exécutées par *Watt*, qui travaillait surtout dans ce système; là d'ailleurs le bas prix de la houille rend moins sensible les avantages de la haute pression. Comme nous l'avons vu, les explosions ne sont pas plus à craindre dans un système que dans l'autre.

1064. Suivant sa destination une machine à vapeur reçoit une infinité de modifications dans ses différentes parties. Ainsi, sur un bâtiment où on ne peut pas avoir un volant qui augmenterait énormément le tirant d'eau, on établit deux machines, et on les fait marcher de manière que le temps faible de l'une réponde au temps fort de l'autre. Dès lors, l'arbre de couche tourne uniformément ainsi que les roues qui font corps avec lui; les balanciers, au lieu d'être au-dessus des cylindres, sont placés latéralement à cause du peu de hauteur de l'emplacement. Sur les bateaux, les chaudières de très grande dimension sont à foyer intérieur, c'est-à-dire qu'elles forment elles-mêmes leur propre fourneau, ce qui retranche la charge qu'occasionnerait la maçonnerie. Il est vrai qu'avec cette disposition, la combustion se fait moins bien, parce que les parois du foyer, maintenues à 100 et quelques degrés seulement par l'eau qu'elles contiennent, refroidissent le combustible. On emploie de même, sur les voitures à vapeur, tout ce qui peut alléger la charge. Il n'y a pas moyen non plus de se servir du volant. Au contraire, dans les filatures, on emploie des volants pesant jusqu'à 30 ou 40 milliers; le frottement sur l'axe consomme, il est vrai, une force de plusieurs chevaux, mais la rotation se fait avec une régularité parfaite, et c'est une condition indispensable, car sans cela les fils casseraient à chaque instant. Dans les forges, le volant est aussi très-lourd, mais dans un autre but; la force à dé-

Modifications suivant la destination.

Usages du volant.

ployer est tantôt plus grande, tantôt plus petite. Il faut, par exemple, une très grande force quand le fer passe entre les laminoirs; l'instant d'après, ceux-ci tournent à vide. Or le volant, à cause de l'inertie, est comme un magasin où la force s'amasse quand il n'y a plus de résistance, et où on la retrouve quand on en a besoin. Cette masse énorme, animée d'une grande vitesse, donne ainsi par moments une force bien supérieure à celle que la machine peut déployer d'une manière continue.

Invention des machines à vapeur.

1065. On trouve chez les anciens quelques idées sur l'emploi de la vapeur comme force motrice. Ainsi Héron d'Alexandrie, qui vivait 120 ans avant J. C., imagina une roue dans le genre du tourniquet à vapeur (1042). En 1543 *Blasco* construisit à Barcelonne un bateau qui devait aussi marcher par la réaction de la vapeur. En 1615 *Salomon de Caus*, ingénieur français, décrivit, dans sa *Raison des forces mouvantes*, une fontaine de compression mise en jeu par la vapeur, dont *Savery* fit le premier des applications en grand en 1698 (1061). Dans un ouvrage imprimé à Rome, en 1629, Giovanni Branca décrivit une espèce d'éolipyle, dont la vapeur allait frapper les ailes d'une roue. Mais le véritable inventeur des machines à piston, appelées d'abord *pompes à feu*, est *Papin*, physicien français, qui décrivit son invention en 1690 et 1695. C'était réellement la machine atmosphérique qui fut appliquée pour la première fois par *Newcomen*, en 1705. Enfin c'est à *Watt*, ingénieur anglais, qu'on doit les perfectionnements les plus importants et les machines telles qu'on les voit généralement aujourd'hui. Watt n'est mort qu'en 1819; en 1808, il avait été nommé l'un des huit associés étrangers de l'Institut. Avant lui, la condensation se faisait par une injection d'eau froide dans le cylindre même, de sorte qu'au coup de piston suivant, les premières portions de vapeur étaient liquéfiées par les parois refroidies. Il imagina alors le condenseur, et il résulta de son emploi une économie telle, qu'il l'établissait à ses frais dans les machines anciennes, demandant seulement le tiers de charbon économisé; ce qui était un produit fort considerable, car, par exemple, à Chacewater, en Cor-

nouailles, sur trois machines il touchait 60 mille francs par an, de sorte que l'économie due au condenseur était de 180 mille francs au moins. Une seconde invention de Watt, est d'avoir changé la machine atmosphérique en machine à double effet, qui est à peu près la seule employée aujourd'hui. Dans la machine atmosphérique, le piston, qui était remonté par un contre-poids, n'était lié au balancier que par une chaîne; mais, dans la machine à double effet, comme il devait agir aussi en montant, il fallait une liaison rigide et qui conservât cependant la verticalité de la tige. Pour cela Watt imagina le parallélogramme articulé; c'était en 1784. On lui doit encore la détente, le régulateur à force centrifuge, la chemise autour du cylindre. Papin avait déjà l'idée des machines à haute pression ainsi que Watt; mais Trevithick et Vivian furent les premiers patentés pour ce système, en 1802. Le système de Wolf, à deux cylindres, est de 1804. Le premier bateau à vapeur réellement employé fut construit par Fulton, en 1807, à New-Yorck.

§ IV. *Force des machines à vapeur.*

Calcul de la force d'une machine à vapeur.

1066. On trouve approximativement la force d'une machine à vapeur bien exécutée par un calcul assez simple. Si, par exemple, la tension est de 5 atmosphères, la pression sur chaque carré de la surface du piston sera de 5^k (493). Supposons la course d'un mètre, dont les 0,6 soient parcourus avec tout l'effort de la vapeur, et le reste pendant la détente : pour premier effet nous aurons 5^k élevés à $0^m,6$ ou $5^k \times 0,6$ élevés à 1^m. Quant à l'effet dû à la détente, on l'aurait à très peu près en calculant la tension à la fin de la course (1047), et en prenant une moyenne. Mais un calcul plus rigoureux montre qu'on a immédiatement ce second effet en multipliant le premier par Log. $\frac{1}{0,6}$ qui est ici 0,512 *. L'effet total est donc

$$5^k \times 0,6 \left(1 + \text{Log.} \frac{1}{0,6}\right).$$

* Il s'agit ici de logarithmes népériens. M. de Prony en a donné des tables, mais on les obtient aisément en multipliant les logarithmes ordinaires par 2,303.

On estime le déchet dû au frottement, aux fuites et au mouvement absorbé par les pompes auxiliaires, etc., à $0^k,4$ par atmosphère et par centimètre carré. On devra donc retrancher $0^k,4 \times 5$ de l'expression précédente; de plus, si la température du condenseur est de 34°, par exemple, la contre-pression équivaudra à $\frac{1}{20}$ d'atmosphère, ou à $0^k,05$ par centimètre carré; de sorte que l'effet définitif sera l'élévation à 1^m d'un nombre de kilogr. égal à

$$5 \times 0,6 \left(1 + \text{Log.} \frac{1}{0,6}\right) - 0,4 \times 5 - 0,05 = 2^k,486.$$

Formule générale.

1037. Si le piston s'élève à 2^m, on aura évidemment un effet double ou $4^k,972$ élevés à 1^m; et, en général, il faudra multiplier l'effet dû à une course d'un mètre par la longueur réelle z de la course *mesurée en mètres*. Il est évident aussi que l'effet dû à la pression sur un centimètre devra être pris autant de fois qu'il y aura de centimètres dans la surface du piston, c'est-à-dire qu'on devra introduire le facteur $0,7854\ d^2$, étant le diamètre en centimètres, ou $7854\ d^2$ en mesurant d en mètres; enfin si le piston mettait une minute à monter on aurait, tout calcul fait, le poids élevé à 1^m en $1'$, mais s'il y a n courses par minute, comme la course descendante produit le même effet, ainsi que nous le verrons, il faudra prendre n fois le résultat calculé; il n'y aurait plus qu'à diviser par 60 si on voulait l'effet par seconde. D'après cela, si nous représentons par a la tension de la vapeur, par a' la contre-pression, par b la fraction de course parcourue sans détente, nous aurons, d étant mesuré en mètres:

$$131\ d^2\ nz \left[ab \left(1 + \text{Log.} \frac{1}{b}\right) - 0,4a - a'\right] \qquad (1)$$

pour le nombre de kilogrammes élevés à 1^m en $1''$.

Prenons, par exemple, $d = 0^m,35$ $n = 30$ $z = 1^m,6$ et les autres quantités comme précédemment, nous trouverons pour la force de la machine 1900^k ou un peu plus

de 25 chevaux, en admettant, comme on le fait ordinairement, 75^k pour la force d'un cheval de vapeur. Dans la manière de compter de Watt, il faudrait diviser par 101 pour avoir la force en chevaux, de sorte que ce mode d'évaluation laisse souvent de l'incertitude d'autant plus que la force réelle d'un cheval n'est guère, terme moyen, que de 40^k élevés à 1^m par seconde.

Force en chevaux.

1068. Pour que la détente produise le meilleur effet possible c'est-à-dire le plus grand travail avec la plus petite quantité possible de vapeur, il faut qu'on ait

Longueur théorique de la détente.

$$b = 0{,}4 + \frac{a'}{a}. \qquad (2)$$

Nous admettrons cela comme un résultat de calcul. Ici $\frac{a'}{a} = 0{,}01$ d'où $b = 0{,}41$; la fraction de course parcourue pendant la détente doit donc être les 0,59 de la course totale dans l'exemple que nous avons choisi; c'est là la plus grande longueur qu'on puisse donner à la détente. Mais en général il y a de l'avantage à laisser arriver la vapeur un peu plus de temps que ne l'indique la théorie; pendant les 0,60 de la course, par exemple, au lieu des 0,41; car on a alors le même effet qu'avec une machine, qui aurait coûté davantage, et le fourneau étant déjà échauffé, la vapeur que l'on consomme ainsi en sus exige proportionnellement moins de charbon pour sa production.

1069. L'équation (2) étant mise sous la forme

Formule qui en résulte.

$$ab - 0{,}4\, a' - a = 0,$$

on voit qu'en supposant à b la valeur donnée par la théorie, l'expression de la force d'une machine à détente se réduit à

$$131\, d^2\, nz\, ab\, \text{Log.}\, \frac{1}{b}. \qquad (3)$$

Supposons par exemple une machine travaillant à 7 atmo-

sphères et demie sans condensation, nous aurons $a = 7,5$, $a' = 1$, $b = 0,533$, Log $\frac{1}{b} = 0,625$; soit $d = 0^m, 35$ $n = 30$, $z = 1^m, 6$; la force sera de 1925^k élevés à 1^m par seconde.

Remarque sur la mesure de la tension.

1070. Dans l'application de ces formules, il faut observer que la valeur de a donnée par le manomètre est ordinairement inexacte; la meilleure manière d'avoir a serait de déterminer la température, la table de Dulong (1019) donnerait ensuite la force élastique. Si on veut calculer, non pas la force que déploie la machine, mais celle qu'on a prétendu lui donner, la température maximum, en France du moins, se trouvera indiquée par les rondelles fusibles (1049).

Remarque sur le coefficient du déchet.

1071. Il est évident que le déchet doit varier d'une machine à l'autre, et même pour la même machine suivant qu'elle fonctionne avec plus ou moins de détente et suivant mille autres circonstances; le coefficient 0,4 que nous avons admis est celui de *Tredgold* et des ingénieurs anglais; celui de M. *Navier* est un peu plus petit. M. de Prony, qui a déterminé ce coefficient directement (1076) sur plusieurs machines, l'a trouvé très variable, et quelquefois même égal à 0,15 seulement, dans des machines très bien construites; de sorte que les formules actuellement en usage ne donnent réellement qu'une grossière approximation.

Force d'une machine d'après le combustible employé.

1072. Nous en dirons autant de la mesure fondée sur la quantité de combustible consommé; dans les meilleures machines à haute pression on brûle au moins 3^k de houille par heure pour une force de cheval, et 4^k dans les machines à basse pression en les supposant toujours bien construites. D'après cela, si on admet la proportion, il est facile de calculer la force; si, par exemple, une machine à moyenne pression brûle 35^k de charbon par heure, on conclut qu'elle est à peu près de 10 chevaux.

Force d'une machine d'après l'effet produit.

1073. Quand une machine ne sert qu'à élever de l'eau, on a aisément sa force en jaugeant l'eau qu'elle élève. Ainsi, la pompe à feu de Chaillot fait monter par heure 1750 hectolitres d'eau à 36^m ou 1750^k à 1^m par $1''$, la force est donc d'à peu près 24 chevaux. Celle du Gros-Caillou, qui

élève par heure 542 hectolitres à 23^m ou 342^k à 1^m par $1''$, est de $4^{ch}61$, en comptant toujours 75^k par cheval. Du reste on voit que la force ainsi évaluée dépend de la bonne ou de la mauvaise construction des pompes que la machine fait mouvoir.

1074. Le *frein de Prony* est considéré aujourd'hui comme le meilleur moyen de mesurer la force des machines à vapeur, et en général de toutes les machines qui font tourner des arbres. Les *mâchoires ab*, *a' b'*, construites pour se faire équilibre, sont serrées sur l'arbre de couche C par les vis à écrous *a a'*, *b b'* de manière que le poids qu'on ajoute à l'une d'elles soit soutenu bien horizontalement par le frottement qui résulte de la rotation. Admettons que la circonférence D D' soit d'un mètre, et que l'arbre fasse précisément un tour par seconde; pour peu qu'on serre les écrous davantage, le frein fera corps avec l'arbre qui dès lors enlèvera le poids en tournant d'ailleurs avec la même vitesse qu'auparavant, tant que la résistance ne changera pas; ce qui à la vérité ne durera qu'un instant. Mais il est certain que la résistance ne changerait pas si le poids pouvait continuer à agir perpendiculairement au même bras de levier pendant toute la rotation; d'où l'on voit que l'effet de la machine, en soutenant le poids horizontalement, revient lui faire parcourir un mètre par seconde en hauteur verticale. Maintenant il est clair que la force sera double si la machine soutient le poids quand la circonférence est double, et que la force doublera encore si le temps de la révolution est moitié moindre; d'où il suit que, pour avoir l'expression générale de la force, il faut multiplier le poids p par la circonférence qu'il tend à décrire, et diviser le produit par la durée de la révolution de l'arbre. La circonférence est $2\pi r$, r désignant le rayon C D mesuré en mètres; le temps de la révolution est $\frac{t}{n}$, en appelant n le nombre de tours pendant le temps t compté en secondes, de sorte qu'on a pour la force cherchée

Force d'une machine par le frein de Prony. Fig. 326

$$\frac{2\pi r p n}{t}$$

kilogrammes, élevés à 1^m par $1''$; en divisant par 75 on aurait la force en chevaux. Soit $r = 2^m, 214$, $t = 60'$, $n = 18$, $p = 70^k$; on sait que $\pi = 3,1416$; la force est donc 292^k ou $3^{ch}, 9$ à très peu près.

Précautions à prendre.

1075 Il y a plusieurs précautions à prendre dans l'emploi du frein; les surfaces frottantes doivent être métalliques, sans quoi elles s'useraient en peu d'instants; elles doivent être arrosées continuellement avec de l'eau froide pour qu'elles ne s'échauffent pas trop. Comme le frottement malgré cela varie d'un moment à l'autre, surtout quand la machine n'a pas de volant, souvent le poids monte ou descend, de sorte qu'on est obligé de serrer et de desserrer de temps en temps les écrous, pour maintenir la barre à peu près horizontale; l'arc qui est à son extrémité fait que le poids agit toujours avec le même bras de levier, pourvu que les excursions ne dépassent pas certaines limites. D'ailleurs, quoi qu'on fasse il reste toujours des oscillations qui établissent une différence notable entre le cas réel et le cas de la théorie, où on suppose le moment du poids tout-à-fait invariable; mais comme l'essai dure 5 ou 6 heures, on admet qu'il s'établit des compensations qui permettent de compter sur le résultat définitif. Une corde sans fin qui passe sur l'arbre fait marcher un compteur pendant l'expérience. Un ingénieur allemand, M. Egen, a remplacé une des mâchoires du frein par une chaîne en plaques de tôle articulées qu'on peut serrer ou desserrer plus facilement que les écrous.

Mesure du déchet dans les machines à vapeur.

1076. Quand on a mesuré la force f d'une machine à vapeur, il est facile de calculer le coefficient du déchet, car en égalant l'expression (1) à la force connue f et représentant par x le coefficient que nous avions supposé égal à a' 0,4, on tire :

$$x = b\left(1 + \text{Log.}\frac{1}{b}\right)\frac{1}{a}\left\{\frac{f}{131\, d^2\, n\, z} + a'\right\}$$

soit par exemple $a' = 1$, $a = 3^{atm}$, $b = 0,375$

Log. $\frac{1}{b}$ = Log. 2,67, = 0,982, $d = 0^m, 35$, $z = 0^m, 724$, $n = 36$, $f = 328^k, 75$; on trouvera $x =$ 0,15.

CHAPITRE V.

VAPEURS CONSIDÉRÉES DANS L'AIR.

§ 1. *Phénomène de l'évaporation.*

1077. A proprement parler, l'*évaporation* consiste dans la formation de la vapeur à l'air libre et sans ébullition. L'évaporation est évidemment une conséquence de la propriété d'émettre des vapeurs dans le vide (997); l'air est passif dans le phénomène, et même au premier abord il semble qu'il devrait empêcher toute évaporation dans les circonstances ordinaires, puisque sa pression équivaut à 760mm de mercure, et surpasse par conséquent de beaucoup la tension habituelle de la vapeur. Mais il faut observer que la vapeur ne presse pas sur les liquides comme le ferait un piston imperméable, il présente des pores où la vapeur peut pénétrer. Il est vrai que la vapeur à saturation présente aussi des vides, et que cependant elle s'oppose à toute évaporation; mais, dans l'état de saturation la distance des molécules est précisément telle que la répulsion se change en attraction, pour peu que l'intervalle diminue; on ne pourrait donc pas introduire de nouvelles molécules sans donner lieu à une liquéfaction proportionnelle.

Ce qu'on entend par évaporation.

Pourquoi la pression de l'air n'empêche pas la vaporisation.

1078. Si l'air ne s'oppose pas entièrement à la formation des vapeurs, au moins il la gêne très notablement. Nous avons vu avec quelle rapidité la vaporisation se faisait dans le vide. Des expériences journalières nous

La vapeur se forme plus lentement que dans le vide.

prouvent qu'elle est beaucoup plus lente dans l'air. Ainsi on sait que l'eau exposée dans un vase ne disparaît complétement qu'au bout d'un temps fort long, quoiqu'il y ait un espace indéfini autour d'elle.

Expérience de Fontana. Fig. 327.

1079. Une expérience de Fontana fait encore très bien ressortir la différence que nous voulons signaler ; il mit la même quantité d'alcool dans deux cornues terminées par des récipients fermés et tout-à-fait pareilles, à cela près que l'une renfermait de l'air et que l'autre n'en contenait pas. Les ayant établies sur un bain de sable légèrement chauffé et ayant fait plonger ses récipients dans de l'eau froide, il vit la distillation marcher très vite dans la cornue vide d'air, tandis qu'elle était à peu près nulle dans l'autre.

Applications.

1080. Dans certaines sucreries on évapore les sirops par le procédé d'*Howard*, qui se réduit à entretenir le vide à l'aide de pompes dans un alambic muni de son serpentin. De cette manière on n'a pas besoin à beaucoup près d'une aussi forte chaleur que si l'on opérait sous la pression atmosphérique et le sucre se trouve bien moins altéré. Quand les chimistes ou les physiciens veulent évaporer certains liquides sans les chauffer, ils les mettent dans le vide, avec des substances capables d'absorber la vapeur à mesure qu'elle se forme. La viande ainsi desséchée peut se garder indéfiniment en conservant tout son goût.

La tension maximum est la même dans l'air que dans le vide. Fig. 328.

1081. Malgré la résistance que l'air oppose à la formation de la vapeur, celle-ci finit par acquérir dans un espace plein d'air la même tension que dans le vide à la même température. On peut s'en assurer en introduisant à l'aide d'un double robinet, assez d'eau pour saturer l'espace dans un grand ballon plein d'air sec, dont la douille est traversée par un baromètre à siphon. A mesure que la vapeur se forme, elle se mêle avec l'air comme le font les gaz dans l'expérience de Berthollet (593) et la pression augmente, car on voit le baromètre monter. Si on opère par exemple à 20°, on obtient une élévation de $17^{mm},3$, précisément égale à la dépression qu'on aurait eue dans le vide (1018). Ici, l'espace étant très grand, l'air ne change pas sensible-

ment de force élastique par le déplacement du mercure, de sorte que la variation du baromètre mesure exactement la tension de la vapeur. On voit dans cette expérience que la force de la vapeur s'ajoute à celle de l'air, et que les choses se passent comme si l'air et la vapeur étaient sans action l'un sur l'autre; mais, dans la réalité, il y a répulsion, ainsi que la résistance à la vaporisation le prouve; seulement, comme la pression de l'air s'exerce également en tout sens sur les molécules de vapeur disséminées, elle ne tend nullement à produire une liquéfaction; dès lors on rentre dans le cas d'un gaz dont on condenserait deux parties dans le même espace; la tension totale doit être la somme des tensions partielles.

On pourrait encore tout simplement faire l'expérience dans un tube barométrique presque rempli d'air, où le mercure monterait seulement assez pour qu'on pût mesurer la dépression produite par la vapeur du liquide qu'on y introduirait; mais comme il résulte de cette dépression un changement de volume, il faudrait, avec la loi de Mariotte, tenir compte de la diminution de force qui en résulte pour le gaz. Dans le cas de deux vapeurs (1022) l'expérience est plus simple, parce que la saturation ayant toujours lieu, le changement de volume ne change pas la force élastique.

1082. Une conséquence bien remarquable des expériences précédentes, c'est qu'un vase vide ou plein d'air à une température déterminée contient toujours le même poids de vapeur quand il y a saturation ou plus généralement quand la vapeur dans les deux cas a la même force élastique. Nous avons pris pour exemple l'air et l'eau; mais la vapeur de tout autre liquide atteindrait de même sa tension maximum dans tout autre gaz, pourvu qu'il n'y eût pas d'action chimique.

Un vase vide ou plein d'air peut contenir le même poids de vapeur.

1083. Nous venons de voir qu'il se formait en définitive autant de vapeurs dans un vase, soit qu'il fût vide, soit qu'il fût plein d'air; il n'en est plus de même dans un espace assez grand pour qu'on ait à tenir compte de la pression exercée par la vapeur en vertu de son poids: le mélange de

Cas d'un espace illimité.

l'air alors permet l'existence d'une plus grande quantité de vapeur. Aussi, comme le remarque M. *Poisson*, si l'atmosphère n'existait pas, il y aurait à la même température moins de vapeur autour de la terre qu'il n'y en a maintenant. Pour concevoir ce fait il faut observer que, dans le cas du vide, la quantité de vapeur serait limitée par la pression que pourrait supporter la couche inférieure. Si la température, par exemple, était de 10°, le poids de toute l'atmosphère de vapeur n'excéderait pas celui d'une couche de mercure de $9^{mm},5$ (1018); si, au contraire, il y a de l'air, quel que soit le poids de la vapeur disséminée, la couche inférieure le supportera. Cela est évident, en supposant d'abord cette couche formée d'air sec; et il est certain que sa force ne diminuera pas quand on y vaporisera de l'eau. D'ailleurs, dans ce cas rien ne force à supposer qu'il y ait saturation, de sorte qu'on ne voit plus de limite.

Sans l'air il y aurait moins de vapeur autour de la terre.

Circonstances qui favorisent l'évaporation.

1084. Après avoir vu le rôle que l'air, supposé calme, joue dans l'évaporation, nous examinerons les circonstances qui influent sur la quantité de vapeur formée dans un temps donné.

1° Grandeur de la surface.

1085. Quand on chauffe un liquide jusqu'à le faire bouillir, l'expérience prouve qu'il se forme sensiblement la même quantité de vapeur, que le vase ait une ouverture large ou étroite; tout dépend alors de la *surface de chauffe*, c'est-à-dire de la surface qui est en contact avec le foyer. Au contraire, quand il y a simplement évaporation, tout dépend de la surface libre. Aussi l'on a bien soin de multiplier la surface partout où l'on veut favoriser l'évaporation. Les marais salants où on extrait le sel des eaux de la mer offrent une application remarquable de ce principe; dans les *bâtiments de graduation* surtout, l'eau des sources salées se trouve divisée à l'infini, en tombant à plusieurs reprises sur une couche épaisse de fagots d'épines, ou bien en coulant le long de plusieurs milliers de cordelettes.

2 Élévation de la température.

1086. Quand un espace est saturé, il semble qu'il n'y ait plus d'évaporation possible; mais, comme on le sait par des expériences vulgaires, on peut forcer la vapeur à s'élever du liquide en le chauffant. Il est vrai qu'elle se

condense d'abord dans l'air encore trop froid; mais toujours est-il qu'elle se forme. La table des tensions (1018) explique pourquoi la chaleur favorise tant l'évaporation; on y voit qu'un peu au-dessous de 100°, la tendance de la vapeur à se former est 150 fois aussi grande qu'à zéro, et que l'équilibre n'est plus possible entre la vapeur naissante et celle qui sature l'espace dès que le liquide est plus chaud que l'air, ou même dès que la température s'élève; aussi le grand moyen d'évaporation dans les arts est-il le chauffage. Les tissus encore tout humides se sèchent en un instant par leur passage sur des cylindres chauffés intérieurement; c'est par ce même procédé que le papier mécanique se trouve sec à mesure qu'il se fait. Si un soleil ardent dessèche les plantes et tout ce qu'il frappe, ce n'est point par une propriété particulière; c'est tout simplement que la chaleur augmente la tendance des liquides à se vaporiser.

1087. L'influence du degré de saturation, c'est-à-dire de la sécheresse ou de l'humidité de l'air sur l'évaporation, est de toute évidence. Lorsqu'on échauffe l'air saturé on peut dire qu'on le dessèche, quoiqu'on n'ôte rien de la vapeur qu'il contient déjà, car on lui donne la propriété d'en prendre une quantité nouvelle. Dans les étuves de raffineries de sucre, l'air contient certainement plus de vapeur qu'au dehors; cependant, comme il est chauffé à 40 ou 50°, on peut dire qu'il est plus sec. Nous nous servons ici des expressions consacrées par l'usage; mais à la rigueur c'est de l'*espace* plus ou moins sec, et non de l'air qu'il s'agit. Si l'évaporation se fait mieux dans un espace chaud, ce n'est pas que la substance de l'air y prenne réellement une propriété desséchante, puisque le phénomène aurait encore lieu dans le vide et même mieux; mais c'est tout simplement parce qu'à une haute température, la vapeur peut prendre une densité plus grande (1010); d'où il suit que dans un même espace il peut s'en former un poids plus grand. **3° Sécheresse de l'air.**

1088. L'élévation de température dans un espace fermé serait un moyen fort borné d'évaporation, si on ne renou- **4° Renouvellement de l'air.**

velait pas l'air. Au contraire, dans bien des cas ce renouvellement à lui seul peut suffire; aussi dit-on que le vent dessèche. Dans la réalité, son action se borne à balayer la vapeur déjà formée, de sorte que les surfaces humides se trouvent toujours dans un espace à peu près sec; cela suppose que le vent lui-même n'est pas humide: on sait très bien que quand il l'est, l'évaporation se fait mal. On peut faire voir l'influence du renouvellement de l'air en faisant tourner rapidement un linge humide avec une fronde; la dessiccation a lieu en quelques instants. Quand il n'y a pas de vent, l'air se renouvelle encore peu à peu, parce qu'il s'élève comme plus léger à mesure qu'il devient humide. Les séchoirs des blanchisseries sont de grands hangars terminés seulement par des jalousies, afin que l'air s'y renouvelle continuellement. Pour sécher dans les étuves, on laisse l'air chaud se saturer d'humidité, puis on ouvre des issues opposées pour qu'il se renouvelle. Dans quelques établissements, on établit un courant d'air chaud; les ouvertures d'entrée et de sortie sont au niveau du sol afin que l'air chaud qui tend toujours à s'élever soit forcé de parcourir tout l'espace. L'air s'échauffe en passant dans des tuyaux qui traversent un foyer; à la sortie de l'étuve se trouve un conduit vertical; quand une fois l'air humide et encore chaud remplit cette espèce de cheminée, il se produit un tirage (628) qui détermine le courant. Montgolfier évaporait très rapidement des jus de fruits à l'aide d'un courant d'air ordinaire produit par un ventilateur (564); ce courant traversait le liquide pendant sa chute sur de petites baguettes qui le divisaient à l'infini comme dans les bâtiments de graduation. On évapore aujourd'hui les sirops dans les sucreries à l'aide d'un courant d'air forcé qui s'élève du fond de la chaudière par une espèce de crible, et traverse toute la masse en petites bulles; de sorte qu'on emploie simultanément la chaleur, la multiplication des surfaces et le renouvellement de l'air. Dans les brasseries on dessèche l'orge germée en faisant passer au travers de la masse le gaz encore extrêmement chaud, résultant de la combustion d'une espèce de houille qui ne donne pas de fumée. Les

fours sur la sole desquels on évapore les dissolutions dans les fabriques de soude artificielle réunissent aussi des conditions très favorables, puisque le liquide, étendu en couche mince, reçoit immédiatement sur sa surface libre l'action de la flamme, qui n'est qu'un courant de gaz excessivement chaud. Quand on veut dessécher complétement des substances organisées pour des analyses, on les met dans un tube où l'on fait passer un courant d'air sec (922), jusqu'à ce qu'elles ne perdent plus rien de leur poids. On peut d'ailleurs opérer avec un tube recourbé, qui plonge dans un bain d'eau ou d'huile porté à la plus haute température que la substance puisse supporter; ce procédé vaut encore mieux que la dessiccation dans le vide

5° Raréfaction de l'air.

1089. La formation des vapeurs, observée comparativement dans l'air et dans le vide, montre assez l'influence de la raréfaction. Aussi, toutes choses égales, l'évaporation se fait-elle bien plus rapidement sur les montagnes très élevées, et en général dans les hautes régions de l'air, malgré un froid très vif, comme l'a constaté M. Gay-Lussac (621); mais à la surface de la terre, les variations dans la pression de l'air sont trop petites pour avoir un effet appréciable, surtout au milieu de tant de causes perturbatrices.

Circonstances qui s'opposent à l'évaporation.

1090. On conçoit facilement pourquoi une couche d'huile mise sur l'eau s'oppose à l'évaporation : elle agit comme un piston imperméable, poussé par une force qui, à la température ordinaire, est bien supérieure à la tension du liquide. En général, quand on connaît les circonstances qui favorisent l'évaporation, on se rend aisément compte de celles qui la retardent; si l'herbe reste fraîche sous les arbres d'une forêt, tandis qu'elle est déjà desséchée dans les plaines ou sur les montagnes découvertes, c'est qu'un feuillage épais, en même temps qu'il arrête les rayons du soleil qui auraient augmenté la tension de la vapeur, limite un espace où l'air se renouvelle à peine et où il est presque toujours saturé. Par des raisons semblables l'évaporation ne se fait pas dans les vallées profondes, dans les lieux bas et abrités; dans les caves surtout, où l'on a soin de placer tout ce dont on veut empêcher la dessiccation.

Les cloches que les jardiniers mettent sur les plantes, entre autres usages, arrêtent l'évaporation, quoique cependant la transpiration continue. On sait que quelques pierres amoncelées au pied d'un arbre sontfort utiles à cause de l'humidité qu'elles y entretiennent.

Mesure de l'évaporisation. 1091. C'est en général par la perte de poids qu'on mesure l'évaporation. Ainsi Dalton a trouvé par la différence de deux pesées que l'eau à 100° perdait en une minute $4^{gr},27$ par décimètre carré. Toutes choses égales, l'évaporation est proportionnelle à la surface, de sorte qu'il est plus simple d'indiquer l'épaisseur de la couche évaporée, l'eau étant supposée au maximum de densité, pour que les résultats soient comparables. Cette épaisseur se calcule aisément d'après le poids et la surface ; ici, par exemple, elle est de $0^{mm},427$.

Résultats relatifs à l'eau. 1092. Par des expériences faites à Paris et aux environs, on a trouvé environ 90 centimètres pour l'évaporation annuelle d'une surface d'eau ; c'est-à-dire que si l'eau n'était renouvelée, ni par la pluie, ni par la rosée, ni autrement, elle baisserait de $0^{m},9$ environ dans le cours de l'année; des expériences faites dans le midi de la France n'ont donné que $0^{m},81$ et en Angleterre $0^{m},7$ seulement. En adoptant 0,81 pour la zone tempérée, on a, terme moyen, $2^{mm},2$ par jour; il s'agit ici d'un jour proprement dit; car l'évaporation est à peu près nulle pendant la nuit. Dans la zone torride M. de Humboldt a trouvé en $12^{h}3^{mm},4$ à l'ombre, et $8^{mm},8$ au soleil.

Résultats relatifs à la glace. 1093. Hauey, par un jour d'hiver fort sec a trouvé que l'évaporation sur la glace à l'ombre était de $0^{mm},82$ en 9^{h}; l'eau pendant ce temps perdait $1^{mm},21$.

Résultats relatifs au sol. 1094. La terre végétale, dans l'état moyen d'humidité où elle est entretenue naturellement, perd en un an une couche d'eau tout au plus égale à 24^{c} si elle est nue, et à 27^{c} si elle est couverte de végétation. L'évaporation n'a guère lieu que pendant le jour; celle de la nuit est souvent plus que compensée par la rosée.

Résultats relatifs aux végétaux. 1095. Hales s'est particulièrement occupé de l'évaporation par les feuilles. Voici les résultats de quelques ex-

périences faites pendant les mois de juillet et d'août; l'épaisseur de la couche évaporée en 12^h de jour est comptée en pouces anglais valant $25^{mm},4$.

Citronnier $\frac{1}{243}$ Vigne $\frac{1}{11}$
Pommier $\frac{1}{204}$ Soleil $\frac{1}{165}$
Chou $\frac{1}{55}$

L'évaporation sur les fruits était à peu près la même que sur les feuilles. La surface totale des feuilles pour le soleil, dont il est ici question, était de 36223 centimètres carrés; l'évaporation moyenne en 12^h de jour allait à 567 grammes; le minimum était de 450^{gr} et le maximum de 793. Elle ne dépassait par 75^{gr} dans les nuits les plus chaudes et sans rosée sensible. Ce soleil sans les racines pesait 1350^{gr}, et 336 seulement après avoir été desséché.

1096. D'après les expériences de Sanctorius, les $\frac{5}{8}$ du poids des aliments sont perdus par l'évaporation qui se fait à la surface de la peau et dans les poumons. Seguin en 24^h perdait ainsi, terme moyen, 1375 grammes; 875 par l'évaporation cutanée, et 500 par l'évaporation pulmonaire; c'est à peu près par minute 1^{gr}, $0^{gr},6$ et $0^{gr},4$. La plus grande perte totale était par minute de $1^{gr},7$ et la plus petite de $0^{gr},58$, ce qui répond en 24^h à 2448^{gr} et 835^{gr}. L'évaporation cutanée varie beaucoup d'un moment à l'autre; mais l'évaporation pulmonaire varie très peu. Tous ces résultats ont été pris pendant l'état de santé. Résultats relatifs à l'homme.

La surface de la peau étant à peu près de 17400 centimètres, 875^{gr} donnent pour l'épaisseur moyenne de la couche évaporée en 24^h, un demi-millimètre ou $\frac{10}{508}$ de pouce anglais. Hales, d'après les expériences de Keill, avait trouvé $\frac{1}{50}$.

Comme l'expérience le prouve, et comme on le conçoit facilement, c'est en été que notre évaporation est la plus abondante; aussi nous faut-il alors souvent une très grande quantité de liquide pour la compenser. Dans les étuves sèches on augmente artificiellement l'évaporation, et quelquefois d'une quantité énorme. Ainsi Berger et Laroche rapportent qu'étant restés 8′ dans une étuve à 90° C, ils avaient perdu, l'un 190, et l'autre 220 grammes; par consé-

quent plus de 20 fois autant que dans les circonstances ordinaires. Dans une autre expérience, la perte du premier s'éleva à 390 gr en 13′. Dans les étuves humides, la transpiration continue, mais non plus l'évaporation puisque l'espace est saturé et à peu près à la même température que le corps.

Calcul de l'évaporation dans l'air tranquille.

1097. On doit à Dalton une formule empirique avec laquelle on calcule approximativement l'évaporation d'un liquide. Il admet que l'évaporation est proportionnelle à la différence entre la tension de liquide et celle de la vapeur qui est dans l'air. Par une expérience, il trouve une perte de 4 gr,27, par minute et par décimètre carré, l'air étant tranquille; la tension du liquide était de 760 mm et celle de la vapeur dans l'air de 10 mm; dans un autre cas où les tensions sont H et h, la perte p sera donnée par la proportion

$$4^{gr},27 : p :: 760 - 10 : H - h \text{ d'où } p = 0^{gr}00,56\,(H - h).$$

en négligeant 10 devant 760. On négligerait de même h si H était très grand. Nous verrons d'ailleurs dans l'hygromètre comment h se mesure. Dalton a trouvé que la proportion se vérifiait encore quand le liquide était exposé à un vent constant; mais alors on est obligé dans chaque cas de déterminer le coefficient par expérience.

Calcul de l'évaporisation dans l'air agité.

§ II. *Hygrométrie.*

Ce qu'on entend par hygrométrie.

1098. L'*hygrométrie*, comme l'étymologie l'indique, consiste dans la mesure de *l'humidité*. On entend ici par humidité la vapeur répandue dans l'espace ou dans l'air comme on le dit ordinairement.

Moyen de mettre en évidence l'eau contenue dans l'air.

1099. On peut montrer qu'il y a de l'eau dans l'air au moyen d'un vase rempli de glace, dont les parois en peu d'instants se couvrent d'une rosée provenant de la vapeur

liquéfiée par le froid; l'eau coule bientôt goutte à goutte. Ce moyen serait insuffisant si la température était à 0°; mais alors on ajouterait du sel à la glace, et on verrait se former sur les parois une gelée blanche de plusieurs millimètres d'épaisseur, qui augmenterait sensiblement le poids du vase. Pendant ces expériences on aperçoit une espèce de fumée due à ce que la vapeur refroidie à distance, au milieu de l'air, prend la disposition vésiculaire. Pendant l'été, les bouteilles qu'on remonte de la cave se couvrent à plusieurs reprises d'une couche de rosée, quoiqu'on ait soin de les essuyer. C'est évidemment la vapeur contenue dans l'air qui se précipite sur le verre, dont la température est au-dessous de celle où l'air serait saturé. C'est par la même raison que les verres des lunettes s'obscurcissent tout à coup quand on entre pendant l'hiver dans un lieu chaud et un peu humide.

Substances hygrométriques.

1100. On constate encore la présence de l'humidité dans l'air, à l'aide de diverses substances qu'on appelle *hygrométriques*, à cause de la propriété qu'elles ont d'absorber la vapeur contenue dans l'air, ce qui peut servir à en mesurer la quantité. Toutes les substances végétales ou animales un peu sèches sont dans ce cas. Le bois, les divers tissus, les graines, la laine, la corne, l'ivoire même, mis quelque temps dans un lieu humide, augmentent considérablement de poids; c'est même un moyen de fraude fort souvent employé. La plupart des substances minérales sont encore hygrométriques à un certain degré; les pierres, le marbre, le verre même augmentent de poids dans un temps humide, mais le phénomène est surtout bien marqué pour la terre végétale, certaines ardoises, l'argile et en général les minéraux très poreux. L'acide sulfurique concentré, exposé à l'air dans un vase largement ouvert, peut en quelques jours absorber 12 ou 15 fois son poids d'eau, surtout si on a soin d'agiter de temps en temps pour renouveler la surface. La chaux, comme on sait, se réduit en poudre à l'air, à cause de l'eau qu'elle absorbe. Quand une substance solide se résout en liqueur par l'humidité qu'elle prend dans l'air, on dit qu'elle est *déliquescente*; c'est le cas de la potasse caustique,

du chlorure de calcium, de l'acide phosphorique, etc. Certains liquides volatils manifestent la présence de l'eau dans l'air, parce qu'en s'unissant à la vapeur qu'ils rencontrent, ils forment une combinaison moins volatile que chacun des composans et qui apparaît sous forme de fumée. Ce phénomène est très marqué pour les acides hydrochlorique, nitrique, sulfurique anhydre et fluoborique. Les deux derniers surtout peuvent être regardés sous ce rapport comme des réactifs extrêmement délicats. Il est bien prouvé du reste que les vapeurs de ces liquides fumants ne sont plus visibles dans un espace sec.

Hygroscopes.

1101. On donne le nom d'*hygroscopes* à différents appareils qui font reconnaître s'il y a plus ou moins d'humidité dans l'air. Leur construction varie à l'infini ; l'indication des uns dépend d'un changement de poids ; pour les autres, c'est un changement de forme ou de volume. Ainsi des éponges, certains fucus mis dans le bassin d'un peson bien sensible (335) font marcher l'aiguille dans tel ou tel sens, suivant qu'ils absorbent plus ou moins d'humidité ; un tuyau de plume, fermé par un bout et rempli de mercure, change de dimension suivant que l'air est plus ou moins sec. On rend ses variations sensibles en l'ajustant à un tube capillaire ; la balle extérieure dans l'avoine porte une arête qui se tord et détord par les changements d'humidité ; et il est facile de rendre ces mouvements sensibles en y adaptant un index léger. Le *calendula pluvialis* ou *souci-hygromètre* se ferme quand l'air devient humide. Par l'humidité les cheveux s'allongent ; au contraire les cordes de chanvre se raccourcissent et se détordent. Il en est de même des cordes à boyau, et c'est sur leur torsion que sont fondés les hygroscopes qu'on rencontre le plus souvent. Ce sont de petites figures de carton, dont la tête se couvre ou se découvre, suivant que l'air est plus ou moins humide. Ce mouvement est dû à un petit morceau de corde à boyau de 2 ou 3 centimètres, dont un bout est fixe et dont l'autre porte la pièce mobile. Ces instruments sont vendus pour annoncer la pluie ; mais ils indiquent seulement l'humidité, que la pluie ne suit pas toujours.

1102. Le véritable problème de l'hygrométrie consiste à trouver le rapport entre la vapeur que l'air contient et celle qu'il contiendrait s'il était saturé. C'est ce rapport qu'on appelle le *degré* d'humidité ; on donne le nom *d'hygromètres* aux instruments qui le font connaître. Les hygromètres actuellement connus ne font pas immédiatement connaître le degré d'humidité; ils donnent seulement des indications d'après lesquelles on peut le trouver.

Ce que c'est que le degré d'humidité.

Les hygromètres actuels ne le donnent pas immédiatement.

1103. Le meilleur hygromètre est celui de *Saussure*; qu'on appelle aussi *hygromètre à cheveu*, parce qu'il est fondé sur la propriété qu'ont les cheveux convenablement préparés de prendre pour chaque degré de saturation de l'air une longueur déterminée à laquelle ils reviennent toujours exactement. La partie essentielle de l'instrument est donc un cheveu *a b* qu'on dispose de manière à voir facilement de très petites variations dans sa longueur. Pour cela, il est attaché à un point fixe *a* par un bout, et par l'autre à une poulie qu'un petit contre-poids C tend toujours à faire tourner, de sorte qu'il reste légèrement tendu. S'il vient à se raccourcir, il fait tourner la poulie dans un sens malgré le petit contre-poids ; si au contraire il s'allonge, le contre-poids produit une rotation en sens contraire. La poulie porte une aiguille *m n*, dont l'extrémité décrit un arc S H divisé en 100 parties appelées degrés. Le 100e degré, qui est ici en haut, indique l'humidité extrême : on voit par la manière dont le cheveu est attaché que l'aiguille monte de ce côté quand il y a allongement. Le zéro qui est en bas indique l'extrême sécheresse. Un cadre de cuivre ABCD supporte toutes les pièces et de plus un petit thermomètre *t*. L'hygromètre se suspend dans le lieu où l'on veut faire une observation : quand l'aiguille est stationnaire, on note sa position et en même temps le degré du thermomètre. Il faut éviter d'humecter le cheveu en respirant de trop près. Pour faire voyager l'instrument, avant de le mettre dans la boîte on soulève le contre-poids *c*, et on le fixe par la pince P, ainsi que la poulie ; de cette manière le cheveu ne risque pas de se casser ou de se distendre.

Hygromètre de Saussure.

Fig. 329.

Comment on prend une observation.

Construction et graduation.

1104. La préparation des cheveux pour les hygromètres consiste à les faire bouillir quelques minutes dans de l'eau contenant $\frac{1}{100}$ de sous-carbonate de soude; on leur enlève ainsi une matière grasse qui les rend moins sensibles à l'humidité. Avant cette préparation, ils ne se dilatent guère que de $\frac{1}{200}$ en passant de la sécheresse extrême à l'humidité extrême; mais quand ils sont bien préparés, la dilatation peut aller jusqu'à $\frac{1}{45}$. Il y a ordinairement 10 pouces ou 27 centimètres entre les points d'attache, de sorte que l'allongement absolu est de 6 millimètres à peu près. Le cheveu étant placé, voici comment on marque les deux points fixes. Pour avoir l'humidité extrême, il suffit d'enfermer l'instrument pendant quelques heures sous une cloche humide posée sur une assiette pleine d'eau; quand l'aiguille est stationnaire, on la place au moyen de la vis V, pendant que la saturation subsiste, sur le point où l'on veut marquer 100°. Cette vis ne fait que déplacer le point d'attache *a* du cheveu, qui ne se trouve ni plus ni moins tendu dans cette nouvelle position que dans l'autre. La sécheresse extrême s'obtient un peu plus difficilement : il faut, après avoir laissé l'instrument se sécher à l'air, l'établir sous le récipient de la machine pneumatique, au-dessus d'un large vase rempli de petits fragments de chlorure de calcium. Quand il est resté ainsi 24 heures dans le vide sec, le cheveu a généralement perdu toute son humidité; on peut d'ailleurs s'assurer qu'en échauffant un peu le récipient, on ne fait pas marcher l'aiguille vers une sécheresse plus grande; ce qui aurait lieu s'il restait de l'humidité, puisque le seul effet de la chaleur serait d'éloigner encore le point de saturation (1018). Comme on a eu soin de tracer des divisions arbitraires sur l'arc SH on peut noter exactement la position de l'aiguille. On a ainsi le zéro; supprimant ensuite les divisions arbitraires, on divise l'intervalle entre les deux points fixes en 100 parties égales.

L'influence de la température est négligeable.

1105. Nous n'avons point indiqué de température particulière pour faire la graduation de l'hygromètre, parce qu'on trouve toujours à peu près les mêmes points fixes en opérant dans les limites des températures atmosphé-

riques ; ainsi, nous admettrons qu'à 10 ou à 20°, le cheveu prend la même longueur dans un espace saturé : mais en est-il de même pour les degrés intermédiaires de saturation ? Quand le cheveu contiendra par exemple la moitié de l'humidité qu'il peut contenir, prendra-t-il la même longueur à 10 ou à 20° ? L'expérience seule pouvait décider la question, et heureusement cette simplicité de marche peut être admise sans grande erreur, d'après les expériences de MM. Gay-Lussac, Dulong et Melloni. Il est bon cependant de savoir que la chaleur allonge le cheveu et agit par conséquent pour faire croire à une humidité un peu plus grande que celle qui existe réellement.

Sens dans lequel elle agit.

1106. Comme le cheveu ne peut contenir qu'un poids déterminé d'eau, il est tout simple que, dans un espace saturé, il en absorbe toujours le même poids quoiqu'il y en ait autour de lui des quantités fort différentes, suivant que la saturation a lieu à telle ou telle température ; mais pourquoi ne se sature-t-il pas toujours puisqu'il y a bien assez d'eau pour cela même dans un espace non saturé ? C'est que la force de l'absorption est contrebalancée par la tendance de l'eau à se vaporiser ; cette tendance est nulle quand l'air est saturé ; alors la force d'absorption a tout son effet jusqu'à ce qu'elle devienne nulle elle-même. Mais quand l'espace n'est pas saturé, la force d'absorption, qui diminue à mesure que le cheveu s'humecte, finit par se trouver égale à la force de la vaporisation, et dès lors le cheveu ne prend plus rien, quoiqu'il n'ait pas toute l'eau qu'il peut contenir.

Pourquoi le cheveu ne se sature pas toujours.

1107. Il faut bien se garder de confondre le degré de l'hygromètre avec le degré d'humidité ; quand on lit par exemple 60°, on ne peut pas dire que l'air contient les 60 centièmes de l'humidité qu'il pourrait contenir ; ni le double de ce qu'il contiendrait si on avait eu 30° ; cette indication 60° *détermine* seulement un certain degré d'humidité, mais sans le faire connaître. Pour avoir le degré d'humidité, il faut recourir à la table suivante qui est due à M. Gay-Lussac :

Passer du degré de l'hygromètre au degre d'humidité.

1108. *Table des degrés d'humidité.*

Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.
0	0,00	34	17,10	68	44,89
1	0,45	35	17,68	69	46,04
2	0,90	36	18,30	70	47,19
3	1,35	37	18,92	71	48,51
4	1,80	38	19,54	72	49,82
5	2,25	39	20,16	73	51,14
6	2,71	40	20,78	74	52,45
7	3,18	41	21,45	75	53,76
8	3,64	42	22,12	76	55,25
9	4,10	43	22,79	77	56,74
10	4,57	44	23,46	78	58,24
11	5,05	45	24,13	79	59,73
12	5,52	46	24,86	80	61,22
13	6,00	47	25,59	81	62,89
14	6,48	48	26,32	82	64,57
15	9,96	49	27,06	83	66,24
16	7,46	50	27,79	84	67,92
17	7,95	51	28,58	85	69,59
18	8,45	52	29,38	86	71,49
19	8,95	53	30,17	87	73,39
20	9,45	54	30,97	88	75,29
21	9,97	55	31,76	89	77,19
22	10,49	56	32,66	90	79,09
23	11,01	57	33,57	91	81,09
24	11,53	58	34,47	92	83,08
25	12,05	59	35,37	93	85,08
26	12,59	60	36,28	94	87,07
27	13,14	61	37,31	95	89,06
28	13,69	62	38,34	96	91,25
29	14,23	63	39,36	97	93,44
30	14,78	64	40,39	98	95,63
31	15,36	65	41,42	99	97,81
32	15,94	66	42,58	100	100,00
33	16,52	67	43,75		

Je trouve, par exemple, que quand l'hygromètre marque 60° l'air contient les 36 centimètres plus une fraction de l'humidité qu'il pourrait contenir à la température où se fait l'observation. On voit, en parcourant la table,

que l'effet de l'humidité sur le cheveu est de moins en moins grand à mesure que l'on approche du point de saturation.

Construction de la table.

1109. Le procédé de M. Gay-Lussac, pour la construction de la table précédente, est fondé sur ce qu'en ajoutant à l'eau de l'acide sulfurique ou certains sels, on diminue autant qu'on veut la densité de la vapeur qui reste cependant formée d'eau pure. D'après cela, pour avoir le degré d'humidité correspondant à un degré de l'hygromètre, on fait un mélange d'acide sulfurique concentré et d'eau en proportions quelconques, mais connues, et on en introduit un échantillon dans la chambre barométrique. Si quand l'espace est saturé la dépression est, par exemple, de 1mm, 895 à la température de 10°, c'est-à-dire $\frac{1}{5}$ de celle produite par l'eau pure (1018), on conclut (1002) que les densités sont aussi dans le rapport de 1 à 5 et que l'espace contient seulement la cinquième partie de l'humidité qu'il pourrait contenir. On suspend ensuite l'hygromètre dans un vase fermé, au-dessus d'une couche épaisse du même mélange acide; l'excès de vapeur, s'il y en avait, se trouve bientôt absorbé sans changer sensiblement les proportions du mélange, de sorte que, quand l'aiguille reste stationnaire, on peut affirmer que l'air contient les 20 centièmes de l'humidité qu'il pourrait contenir, et on lit le degré correspondant de l'hygromètre. En recommençant cette série d'expériences, avec d'autres proportions d'acide, on a autant de termes de comparaison que l'on veut. Les degrés de l'hygromètre ainsi trouvés sont en général fractionnaires; mais un calcul d'interpolation donne la correspondance pour les degrés entiers.

Observations hygrométriques.

1110. L'indication moyenne de l'hygromètre au niveau des habitations est de 72°, de sorte que, terme moyen, l'air est à moitié saturé. La saturation dans l'atmosphère n'est presque jamais complète; même après une grande pluie, l'aiguille ne dépasse guère 95°, ce qui répond à 0,9 d'humidité. Dans les plus grandes sécheresses l'air contient encore environ $\frac{1}{6}$ de la vapeur nécessaire à sa saturation, car jamais l'hygromètre ne descend au-dessous de 30° à la surface de la terre. Dans son voyage aérostatique, M. Gay-Lussac

l'a vu à 26° à une hauteur de 6000^{m}; le degré d'humidité était donc $\frac{1}{8}$ seulement. Sur le sommet des Alpes, Saussure n'a jamais vu l'hygromètre au-dessus de 40°, d'où il suit que l'air à cette hauteur ne contient pas le quart de l'humidité qu'il pourrait contenir. D'après la marche de l'hygromètre pendant l'ascension de M. Gay-Lussac, on peut, en représentant par 100 l'humidité de l'air à la surface de la terre, former le tableau suivant de son humidité à différentes hauteurs:

Décroissement de l'humidité à mesure qu'on s'élève.

A la surface.	100	à 4000^{m}.	21
1000^{m}.	80	5000.	12
2000.	62	6000.	9
3000.	42	7000.	7

Tension de la vapeur dans l'air.

1111. Nous pouvons maintenant connaître sans peine la tension de la vapeur contenue dans un espace donné. Si l'hygromètre marque 30° nous concluons par la table des degrés d'humidité que la tension actuelle forme 0,20 de la tension maximum. Celle-ci nous est donnée par une table (1018) quand nous connaissons la température, de sorte que, si le thermomètre est à 20°, la tension cherchée est 0,17^{mm}, $3 \times 0{,}20 = 3^{mm}\,46$. Quand on a trouvé cette tension h, l'expression $\frac{284h}{267+t}$ donne immédiatement en milligrammes le poids de la vapeur contenue dans un litre d'air à la température t que l'on considère (1010) (1082),

Poids de la vapeur contenue dans un espace donné.

Remarque.

1112. Dans les circonstances atmosphériques ordinaires, du moins entre 0 et 27°, la force élastique de la vapeur estimée en millimètres donne immédiatement, à moins d'un milligramme, le poids de la vapeur contenue dans un litre d'air, exactitude bien suffisante en général dans les questions d'hygrométrie. A 17° l'exactitude serait absolue puisque le facteur de h se réduirait à l'unité.

Poids d'un volume donné d'air humide.

1113. Quant au poids d'un litre d'air humide, il est facile à calculer, puisque c'est la somme des poids d'un litre d'air sec (943) et d'un litre de vapeur; il faut seulement observer que la force élastique de l'air sec n'est alors que la différence $H-h$

entre la hauteur du baromètre et la tension de la vapeur.

On a ainsi $1^{gr},3 \times \dfrac{\dfrac{H - \frac{3}{8} h}{760}}{1 + \dfrac{t}{267}} = \dfrac{0,456\,H - 0,172\,h}{267 + t}$

1114. Si on veut l'expression générale de la densité de l'air humide, il n'y a qu'à prendre le rapport entre les poids d'un litre d'air humide et d'un litre d'air sec; ce rapport, qui est indépendant de la température, se réduit à $1 - \dfrac{3h}{8H}$; d'où il suit que l'air humide est toujours plus léger.

Densité de l'air humide.

1115. Pour calculer le volume auquel se réduirait une masse d'air humide si on venait à la dessécher, il faut observer que l'air du mélange qui supportait d'abord la pression H-h, supporte à lui seul la pression H tout entière après la dessication. Or en désignant par V et v les volumes correspondants, on a par la loi de Mariotte

Correction de l'humidité.

$$H-h : H :: v : V;\ \text{d'où}\ v = V\left(1 - \frac{h}{H}\right).$$

Si, par exemple, on a recueilli sur l'eau dans une cloche graduée un litre d'air à 18°,75, sous la pression de 760^{mm}, on pourra considérer cet air comme saturé; la table des tensions donnera par un petit calcul $h = 16$, d'où $v = 0^{l},9789$.

1116. La proportion résout évidemment la question inverse, c'est-à-dire qu'elle fait connaître ce que deviendrait un volume v d'air sec sous la pression H, si on y introduisait de la vapeur ayant la tension h; l'inconnue alors serait V, et on aurait

Volume que prend l'air en devenant humide.

$$V = \frac{vH}{H-h} = 1^{l},0215$$

en supposant $v = 1^{l}$ $H = 760$ et $h = 16$.

1117. Après l'hygromètre de Saussure, c'est celui de Daniel qu'on rencontre le plus fréquemment. Il est fondé sur ce que le degré d'humidité de l'air se calcule aisément quand on connaît le *point de rosée* c'est-à-dire la tem-

Hygromètre de Daniel. Fg. 330. Ce que c'est que le point de rosée.

pérature où l'air est saturé, et où par conséquent la vapeur commence à se déposer. Il se compose de deux boules de verre communiquant par un tube recourbé assez large. La boule inférieure est aux deux tiers pleine d'éther, où plonge un petit thermomètre; on a chassé l'air du reste de l'appareil par l'ébullition, la boule supérieure est couverte d'une mousseline sur laquelle on verse de l'éther, qui produit du froid en s'évaporant. Dès lors l'éther intérieur vient s'y condenser par une véritable distillation, et la boule inférieure se trouve à son tour refroidie. Il arrive un moment où la vapeur ambiante commence à s'y déposer. On note alors le degré marqué par le thermomètre intérieur; ce degré indique sensiblement la température de l'air en contact avec la boule, et cette température, d'après les expériences de Dalton, est d'un demi-degré au-dessous du point de rosée. On peut encore, pour avoir ce point, attendre le moment où la vapeur déposée disparaît, et prendre la moyenne des deux indications thermométriques. Comme la boule est en verre opaque, la vapeur la ternit comme un miroir, et on saisit assez facilement l'instant de l'apparition et de la disparition de la rosée; celle-ci forme d'abord une zone circulaire au niveau du liquide. Supposons qu'on ait trouvé ainsi le point de rosée à 11° et que la température de l'air donnée par un thermomètre extérieur qui fait ordinairement partie de l'instrument soit de 25°, on cherchera les tensions correspondantes (1018) et leur rapport $\frac{10}{23} = 0,44$ donnera le degré d'humidité.

Manière de prendre une observation.

Théorie.

1118. En effet, nous venons de constater que si l'air qui est maintenant à 25° descendait à 11°, il serait saturé; mais dans l'état de saturation la tension de la vapeur est donnée par la table; c'est ici 10^{mm}. Le refroidissement ne l'a pas changée, puisqu'il ne change pas les proportions des deux gaz et que la pression atmosphérique qu'ils supportent proportionnellement reste la même pendant l'expérience, ainsi, nous pouvons affirmer que dans l'air à 25° la tension de la vapeur est actuellement de 10^{mm}; ce qui donne $\frac{284 \times 10}{267 + 25}$ pour le poids d'un litre de cette vapeur (1010). Mais le poids de toute la vapeur que pourrait contenir un litre d'air

saturé à cette même température de 25° est $\frac{224\times28}{267\times25}$; donc $\frac{10}{23}$, qui est le rapport de ces deux poids sera évidemment le degré d'humidité.

1119. Quand on a le degré d'humidité on peut trouver le degré correspondant de l'hygromètre de Saussure avec la table suivante; on contrôle ainsi les deux instruments l'un par l'autre.

Table pour la comparaison des deux hygromètres.

Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.
0	0,00	34	57,42	68	84,06
1	2,19	35	58,58	69	84,64
2	4,37	36	59,61	70	85,22
3	6,56	37	60,64	71	85,77
4	8,75	38	61,66	72	86,31
5	10,94	39	62,69	73	86,86
6	12,93	40	63,72	74	87,41
7	14,92	41	64,63	75	87,95
8	16,92	42	65,53	76	88,47
9	18,91	43	66,43	77	88,99
10	20,91	44	67,34	78	89,51
11	22,81	45	68,24	79	90,03
12	24,71	46	69,03	80	90,55
13	26,61	47	69,83	81	91,05
14	28,51	48	70,62	82	91,55
15	30,41	49	71,42	83	92,05
16	32,08	50	72,94	84	92,54
17	33,76	51	72,21	85	93,04
18	35,43	52	73,68	86	93,52
19	37,11	53	74,41	87	94,00
20	38,78	54	75,14	88	94,48
21	40,27	55	75,87	89	94,95
22	41,76	56	76,54	90	95,43
23	43,26	57	77,21	91	95,90
24	44,75	58	77,88	92	96,36
25	46,24	59	78,55	93	96,82
26	47,55	60	79,22	94	97,29
27	48,86	61	79,84	95	97,75
28	50,18	62	80,46	96	98,20
29	51,49	63	81,08	97	98,69
30	52,81	64	81,70	98	99,20
31	53,96	65	82,32	99	99,55
32	55,11	66	82,90	100	100,00
33	56,27	67	83,48		

§ III. *Météores aqueux.*

Ce qu'on entend par météores aqueux.

1120. On entend, en général, par *météores* des phénomènes qui se passent à une certaine hauteur dans l'atmosphère; et par *météores aqueux* ceux dans lesquels l'eau joue le principal rôle.

Rosée.

1121. La rosée est cette humidité dont les corps se couvrent dans l'air, à cause du refroidissement. On peut constater directement qu'après le coucher du soleil, certains corps se refroidissent plus que l'air; et il n'y a rien d'étonnant à ce qu'ils se couvrent d'humidité, d'après ce que nous avons vu précedemment (1099). Quant aux causes mêmes du refroidissement, nous les examinerons en parlant du rayonnement de la chaleur.

Gelée blanche.

1122. La gelée blanche consiste dans la congélation de la rosée. Pour qu'elle ait lieu, il suffit que les corps sur lesquels se forme la rosée soient au-dessous de 0° (1099); l'air peut rester au-dessus de cette température.

Serein.

1123. La vapeur contenue dans l'air peut se liquéfier sans le contact d'un corps froid. Si le point de saturation est à peine dépassé, la transparence de l'air n'est pas troublée par les vésicules isolées qui se forment alors. C'est en cela que consiste le *serein*, qui n'est à proprement parler qu'un brouillard invisible formé après le coucher du soleil.

Brouillards.

1124. Les brouillards sont des amas assez denses de vapeur vésiculaire (987) étendus au-dessus du sol en couche ordinairement peu épaisse; de sorte qu'on se trouve souvent au-dessus d'eux, en s'élevant sur une petite colline ou sur un édifice. Les circonstances de leur formation sont quelquefois très simples; ainsi, ceux qu'on voit sur les rivières, sur les étangs, etc., se forment précisément comme la fumée qui s'élève d'un vase plein d'eau chaude; en effet, pendant ces brouillards, on trouve généralement l'eau plus chaude que l'air. Quant à la formation de la vapeur vésiculaire, il faut dans ce cas concevoir que l'air humide et chaud qui est en contact avec le liquide monte comme plus léger, se mêlant à l'air froid qui est au-dessus

et qui afflue latéralement. Pour que la vapeur prenne alors la disposition vésiculaire, il suffit que la température du mélange soit assez basse pour qu'il y ait sursaturation. Dans les mers polaires, où les eaux sont toujours chaudes par rapport à l'air, il y a des brouillards presque perpétuels auxquels on donne le nom de *brumes polaires*. Brouillards sur les eaux.

1125. Les brouillards sur le sol se forment au contraire quand celui-ci est plus froid que l'air; les choses se passent alors comme autour d'un vase contenant un mélange réfrigérant (1099). C'est surtout dans les prairies où l'air s'est saturé d'humidité à une haute température, qu'on voit ces brouillards se manifester le soir après le coucher du soleil. Brouillards sur le sol.

1126. Les brouillards qui précèdent et accompagnent ordinairement le dégel se forment à peu près de même par un vent tiède qui amène de l'air humide dans une atmosphère froide, contre un sol et des édifices depuis longtemps refroidis. Brouillards pendant le dégel.

1127. Enfin, certains brouillards qui ont une grande épaisseur sont évidemment dus à l'abaissement des nuages arrivés peu à peu au niveau du sol. Ils se manifestent sans changement notable dans la température et sans qu'il y ait de vent. Brouillards par la descente des nuages.

1128. On donne le nom de *bruine* à une petite pluie très fine qui résulte de la liquéfaction d'un brouillard. Quand la température est très basse, le brouillard produit le *givre*, qui consiste en petites aiguilles de glace dont les corps froids se trouvent hérissés. Bruine. Givre.

1129. Les nuages sont des amas de vapeur vésiculaire, qui ne diffèrent des brouillards que parce qu'ils sont suspendus dans l'atmosphère. Leur suspension est analogue à celle des montgolfières; elle est due à ce qu'ils contiennent de l'air plus chaud, et par conséquent plus léger que l'air environnant. Cet excès de chaleur vient principalement de ce que les nuages interceptent les rayons du soleil; ils s'abaissent souvent le soir et pendant la nuit, on les traverse souvent en s'élevant sur des montagnes médiocres et on les voit alors comme un brouillard à ses pieds. Nous savons Nuages. Leur suspension.

qu'ils peuvent descendre jusqu'à terre; généralement ils se tiennent à 1000 ou 1200 mètres, mais d'autres s'élèvent beaucoup plus (621).

Leur formation. 1130. Les nuages se forment par le mélange de deux masses d'air humide ayant des températures différentes. Il est à remarquer qu'il y a toujours sursaturation et par conséquent formation de vapeur vésiculaire lors du mélange de deux couches saturées quelque petite que soit la différence de température. Cela tient à ce que la densité maximum de la vapeur à la température du mélange est toujours moindre que la densité moyenne du mélange, ainsi qu'on peut s'en assurer par la table des tensions (1108). Mais ce cas de saturation complète n'est pas le plus ordinaire dans les hautes régions.

Formation de la pluie. 1131. La pluie provient évidemment de la liquéfaction des nuages, c'est-à-dire de la transformation des vésicules en gouttes. L'accumulation de la vapeur vésiculaire, l'agitation produite par des courants de directions différentes sont les causes principales de la formation de la pluie. On a lieu de croire que l'électricité joue aussi un rôle important dans ce phénomène.

Causes occasionnelles. 1132. La cause occasionnelle la plus fréquente de la pluie est l'arrivée d'un vent humide. En France par exemple, les vents de l'ouest et du sud, qui ont balayé les mers et qui ont une température assez élevée, apportent une quantité considérable de vapeurs qui, se refroidissant dans notre atmosphère, forment des nuages et par suite de la pluie. Les localités ont une influence évidente sur la pluie ; aussi il pleut très rarement à Madrid, presque jamais dans la Basse-Egypte.

Udomètre. Fig. 325. 1133. On mesure la pluie en la recevant dans un vase qu'on appelle *udomètre*, à cause de cet usage; c'est un cylindre à double fond : la partie supérieure fait fonction d'entonnoir, et l'inférieure de réservoir; un tube latéral donne la hauteur de l'eau. Le même instrument reçoit la neige et la grêle.

Quantité annuelle de pluie. 1134. Voici la quantité moyenne d'eau qui tombe annuellement dans différens lieux :

	Centimètres.		Centimètres.
Cap français (Saint Domingue).	308	Viviers......	92
La Grenade (Aux Antilles)....	284	Lyon	89
Tivoli (Saint-Domingue)......	273	Liverpool....	86
Garfagnana (duché de Modène.	249	Manchester...	84
Bombay..................	208	Venise.......	81
Calcutta..................	205	Lille.........	76
Kendal (Angleterre).........	156	Utrecht......	73
Gênes....................	140	La Rochelle...	66
Charlestown................	130	Londres......	53
Pise......................	124	Paris........	50
Milan.....................	96	Marseille.....	47
Naples....................	95	Pétersbourg...	46
Douvres..................	95	Upsal........	43

1135. La hauteur donnée pour Paris est la moyenne de plus de 100 années d'observations; elle se rapporte à l'udomètre placé sur la terrasse de l'Observatoire ; il est bon de savoir qu'un udomètre situé dans la cour reçoit, terme moyen, 6 centimètres de plus. Le fait du reste paraît général : la quantité de pluie est moins grande dans les lieux élevés. Nous remarquerons que d'une année à l'autre la quantité de pluie varie quelquefois du simple au double et qu'un seul orage peut donner la moitié de ce qui doit tomber dans l'année entière. Aussi les années communément appelées pluvieuses ne sont pas toujours celles où il tombe le plus de pluie, mais plutôt celles où la pluie tombe plus fréquemment. On voit d'après le tableau, qu'en général la quantité de pluie augmente à mesure qu'on se rapproche de l'équateur; c'est à peu près l'inverse pour le nombre des jours de pluie, de sorte que dans la zone torride il tombe souvent en une seule journée des quantités énormes d'eau. Observations.

1136. D'après des calculs très exacts faits pour diverses localités, la quantité annuelle de pluie suffit largement à l'alimentation des divers cours d'eau, lors même qu'on tient compte des pertes faites par l'évaporation ou autrement. On ne doit donc pas chercher ailleurs l'origine des fleuves Origine des fontaines.

et des fontaines. On sait d'ailleurs que les sources tarissent ou diminuent notablement dès qu'on reste pendant quelques mois sans pluie.

Neige. 1137. La neige se forme dans les hautes régions de l'atmosphère, où nous savons que la température est bien au-dessous de zéro. Les nuages qui s'élèvent jusque là se gèlent peu à peu; de l'air moins froid que l'air ambiant reste emprisonné dans cet assemblage de petites aiguilles de glace, de sorte que l'ensemble peut encore se soutenir; l'existence de nuages formés ainsi de petits glaçons est démontrée par certains phénomènes d'optique. Mais la vapeur peut aussi se geler directement et sans passer par l'état vésiculaire, il suffit pour cela que le froid soit très grand; si alors l'air est tranquille, les molécules de glace se groupent par leurs faces de plus grande attraction et la neige se présente en cristaux réguliers. Le capitaine Scoresby, qui a séjourné long-temps dans les régions polaires, y a particulièrement étudié cette cristallisation de la neige dont on voit ici quelques exemples. On remarquera que les angles d'assemblage sont presque exclusivement de 60 et de 120°. Fig. 326.

Neige rouge. 1138. La neige rouge qu'on trouve dans certaines localités, particulièrement sur le mont Saint-Bernard, doit sa couleur à une plante cryptogame excessivement petite, à laquelle on a donné le nom d'*uredo nivealis*.

Grésil. 1139. Le *grésil* se compose de petites pelotes ordinairement coniques et beaucoup plus compactes que la neige; il paraît dû à une congélation brusque de la vapeur vésiculaire par son mélange avec un courant d'air très froid et animé d'une grande vitesse.

Grêle. 1140. La grêle, beaucoup plus dense que le grésil, résulte de la congélation de gouttes toutes formées.

Les grêlons présentent ordinairement des couches alternativement opaques et transparentes; leur surface est souvent hérissée de grains plus petits; on en a vu qui pesaient une demi-livre et même davantage. La grêle est liée aux orages; elle ne tombe guère qu'en été et pendant le jour, sa chute ne dure que quelques minutes sur le même point;

mais un nuage de grêle parcourt quelquefois une étendue de plus de 100 lieués avec une vitesse de 15 à 16 lieues à l'heure. Nous donnerons ici le résumé des observations faites dernièrement par M. Lecoq, professeur d'histoire naturelle, qui s'était placé sur le Puy-de-Dôme, à Clermont, au milieu même d'un nuage à grêle :

1° Il paraît que la grêle se forme pendant les vents d'impulsion et non pendant ceux d'aspiration ;

2° Deux couches de nuages superposés et deux vents contraires sont nécessaires pour produire la grêle ;

3° Les grêlons ne vont pas d'un nuage à l'autre, comme le supposait Volta, ils sont au contraire animés d'une vitesse horizontale très grande et ils voyagent poussés par un vent très froid ;

4° Selon toute apparence, le nuage supérieur est électrisé et soutient l'inférieur pendant sa marche ;

5° Les grêlons ne se choquent pas pendant leur transport horizontal, et le roulement qu'on entend de si loin est dû à la réunion des bruits partiels produits par chaque grêlon qui traverse l'air avec vitesse ; le choc de quelques grêlons, pendant leur trajet, les fait immédiatement tomber.

CHAPITRE VI.

CHALEUR SPÉCIFIQUE.

§ I. *Chaleur spécifique des solides et des liquides.*

1145. De même qu'on jauge les liquides sans se douter de leur composition chimique ; qu'on mesure le temps, les forces, la vitesse, etc., sans connaître leur nature, on peut évidemment mesurer la chaleur avant de savoir en quoi elle consiste. Tout se réduit à prendre pour unité une quan- Unité de chaleur.

tité de chaleur bien déterminée. L'unité adoptée généralement est *la chaleur nécessaire pour élever* 1^k *d'eau de* 0 *à* 1°; on lui donne quelquefois le nom de *calorie*, de *therme*, etc.

Chaleur spécifique.

1142. On a longtemps cru qu'à poids égal les différentes substances contenaient la même quantité de chaleur quand la température était la même; mais Black, physicien du siècle dernier, démontra qu'il n'en était pas ainsi; on eut dès lors l'idée de *la chaleur spécifique*, qui est *la chaleur nécessaire pour faire varier d'un degré la température de chaque substance sous l'unité de poids.*

Elle est constante entre 0 et 100°. Vérification pour l'eau.

1143. Il est facile de s'assurer que la chaleur spécifique de l'eau est constante entre 0 et 100°, c'est-à-dire qu'entre ces limites, il faut toujours la même quantité de chaleur pour faire varier d'un degré la température d'un kilog. d'eau. En effet, si en supposant cette invariabilité nous calculons la température des mélanges d'eau chaude et d'eau froide, nous trouverons toujours un accord parfait entre les résultats de l'expérience et ceux du calcul. Prenons, par exemple, 1^k d'eau à 20°; dans notre hypothèse il contient, *à partir de zéro*, précisément 20 unités de chaleur; mêlons-le avec 1^k qui en contienne 40, c'est-à-dire qui soit à 40°, nous aurons en tout 60 unités, lesquelles réparties entre les 2^k, devront porter à 30° la température du mélange; et c'est aussi ce qui a lieu quand on tient compte, comme nous l'indiquerons par la suite, de la chaleur absorbée par le vase ou perdue par le rayonnement.

Vérification pour les autres substances.

1144. La chaleur spécifique des autres substances est également constante, c'est-à-dire que s'il faut un cinquième d'unité de chaleur pour porter 1^k de marbre de 0 à 1°, il en faudra une quantité pareille pour le porter de 1° à 2°, et ainsi de suite; cela se vérifie, comme nous le verrons, par le procédé même qui sert à mesurer la chaleur spécifique.

Remarque.

Il s'agit dans tout ceci du thermomètre à mercure; l'invariabilité des chaleurs spécifiques ne s'observerait pas si les degrés étaient comptés sur le thermomètre à alcool.

1145. On ne peut pas mesurer toute la chaleur que renferme un corps; mais on arrive à déterminer celle qu'il contient à partir de zéro jusqu'à une température donnée

Chaleur à partir de 0°.

soit au-dessous soit au-dessus. L'expression de cette quantité de chaleur est même extrêmement simple dans ce dernier cas, pourvu qu'on ne dépasse pas beaucoup 100°, parce que dans ces limites la chaleur spécifique est constante. On trouvera par exemple aisément qu'il y a 30 unités de chaleur dans 10^k de marbre à 12°, en admettant que la chaleur spécifique soit 0,25; car puisque par la supposition même il y a 0,25 d'unité dans 1^k à 1° il y en aura 3 dans 1^k à 12° et 10 fois autant ou 30 dans un poids 10 fois aussi grand. En généralisant on voit que c étant la chaleur spécifique, m la masse mesurée par le poids en kilogr. et t la température dans les limites où la chaleur spécifique est constante, on a $m\,c\,t$ pour la quantité de chaleur contenue à partir de zéro.

Mesure de la chaleur spécifique, par la méthode des mélanges.

1146. Cette expression donne une formule générale pour mesurer la chaleur spécifique par la méthode dite des mélanges.

Versons, par exemple, m^k d'eau à $t°$ dans un vase de verre à la température t' et pesant m'; les chaleurs spécifiques étant 1 pour l'eau et c' pour le verre, nous aurons $m\,t + m'\,c'\,t'$ pour la quantité de chaleur avant le mélange; après le mélange ce sera $m\,\theta + m'\,c'\,\theta$; en désignant par θ la température moyenne. Comme elle s'établit assez rapidement pour qu'il n'y ait pas de perte sensible, les deux quantités de chaleur seront égales, ce qui fournira l'équation

$$\text{(A)}\quad m\,t + m'\,c'\,t' = m\,\theta + m'\,c'\,\theta \ \text{d'où}\ c' = \frac{m\,(t-\theta)}{m'(\theta - t')}$$

soit, $m = 1^k$, $t = 40°$, $m' = 0^k\,5$, $t' = 10°$, $\theta = 37°5$; on tirera $c' = 0,18$; ainsi il faut 18 centièmes d'unité de chaleur pour élever d'un degré la température d'un kilog. de verre. Comme en variant les températures entre 0 et 100° on retombe toujours sur le même résultat, on a le droit de conclure que la chaleur spécifique du verre est constante entre ces limites.

Pour trouver la chaleur spécifique c'' d'une autre substance, on en versera un poids m'' à la température t'' dans

un vase de verre contenant de l'eau et on notera la température θ du mélange; alors l'équation des quantités de chaleur sera

$$(B) \qquad m t + m' c' t + m'' c'' t'' = m \theta + m' c' \theta + m'' c'' \theta$$

$$\text{d'où } c'' = \frac{(m + m' c')\,(t - \theta)}{m''(\theta - t'')}$$

Application au mercure.

Si on fait l'expérience avec du mercure on trouvera $c' = 0{,}033$, ce qu'on pourra d'ailleurs vérifier simplement en mêlant 1^k de mercure à 0° avec 1^k d'eau à 31°, on obtiendra un mélange à 30°; d'où l'on voit, en négligeant ce qui a rapport au vase, qu'une unité de chaleur suffit pour élever 1^k de mercure de 0 à 30°, et que par conséquent sa chaleur spécifique ou la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1° est $\frac{1}{30}$.

Précautions à prendre.

1147. La méthode des mélanges exige plusieurs précautions : 1° Si la substance dont on veut déterminer la chaleur spécifique a une action chimique sur l'eau, il faut l'enfermer dans un petit vase métallique offrant la plus grande surface possible et fermant hermétiquement, afin qu'on puisse le plonger en totalité; 2° le vase contenant l'eau doit aussi être généralement en métal et très mince, afin qu'il soit toujours exactement à la température de l'eau qu'il contient; 3° il faut qu'il pose seulement par trois pointes pour qu'il y ait le moins possible de chaleur transmise; 4° les corps solides dont on voudra déterminer la chaleur spécifique devront avoir une grande surface, afin que l'équilibre de température s'établisse plus promptement; 5° ainsi il est avantageux de leur donner la forme d'anneaux plats. Il faut opérer de manière que la température du mélange diffère peu de celle de l'appartement pour éviter de perdre ou de recevoir de la chaleur; 6° le procédé pour élever à une température bien déterminée les corps sur lesquels on veut opérer consiste à les tenir quelque temps dans l'eau bouillante; on peut en général négliger la petite couche qui adhère à leur surface; 7° enfin on doit tenir compte de la chaleur pendant l'expérience, s'il faut 8 à 10 miuutes, par exemple, pour que l'équilibre s'établisse.

1148. *Chaleur spécifique des solides et des liquides entre 0 et 100°*

Eau	1
Acide nitrique $d = 1,3$	0,66
Alcool $d = 0,793$	0,622
Acide hydrochlorique $d = 1,53$	0,6
Éther sulfurique $d = 0,715$	0,52
Bois, environ	0,5
Essence de térébenthine $d = 0,872$	0,472
Phosphore	0,385
Acide sulfurique $d = 1,84$	0,33
Huile d'olive	0,31
Nitrate de potasse	0,269
Carbone	0,257
Sel marin	0,221
Carbonate de chaux	0,2
Alumine anhydre	0,2
Peroxide de manganèse	0,191
Soufre	0,188
Chaux anhydre	0,179
Silice (quartz)	0,179
Verre	0,177
Fer	0,11
Cuivre	0,0949
Zinc	0,0927
Iode	0,089
Arsenic	0,081
Argent	0,0557
Étain	0,0514
Mercure	0,033
Platine	0,0314
Or	0,0298
Plomb	0,0293

Applications. Chaleur remarquable de l'eau.

1149. On voit que s'il faut une unité de chaleur pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'eau, il en faut en général beaucoup moins pour les autres sub-

stances. La chaleur contenue dans 1k d'eau bouillante suffirait pour élever à la même température environ 3k d'acide sulfurique, 9 de fer, 34 de mercure, de platine, d'or ou de plomb ; 1k d'eau à 100° contient 100 unités de chaleur : il n'y en a pas 70 dans 1k de fer chauffé au rouge, c'est-à-dire porté à 5 ou 600°, et pas même 60 dans le même poids d'argent sur le point de se fondre. Aussi l'eau est-elle d'un emploi continuel pour absorber la chaleur, comme on le voit dans la trempe, dans les bains froids, les affusions après les brûlures, etc.

— des liquides en général.

Il est à remarquer que les liquides exigent en général plus de chaleur que les solides pour s'échauffer autant ; mais cela tient à leur composition, et non à la liquidité, puisque le mercure, quoique liquide a une très petite chaleur spécifique.

Faible chaleur des métaux les plus denses.

Les métaux sont de tous les corps ceux dont la température change avec le moins de chaleur possible, et parmi eux ce sont en général les plus denses qui, à température égale, contiennent le moins de chaleur.

Vitesse d'échauffement et de refroidissement.

1150. Il est évident que, toutes choses égales, les changements de température seront plus rapides dans les substances qui ont une petite chaleur spécifique ; que le cuivre, par exemple, s'échauffera et se refroidira plus vite que l'or. Mais pour les métaux ces différences sont peu sensibles. Il n'en est pas de même de l'eau ; sa lenteur à s'échauffer est remarquable ; ainsi de l'huile mise devant le feu sera déjà à 100° quand l'eau ne sera pas même à 50. Il doit s'écouler une longue suite de jours chauds, pour que les rivières prennent la température de l'été ; mais aussi une nuit ne suffit pas pour les refroidir, comme cela arrive pour le sol. Au lever du soleil, quand l'air est le plus froid possible, on trouve encore l'eau sensiblement aussi chaude que la veille.

Questions relatives à la température des mélanges.

1151. La table des chaleurs spécifiques donne le moyen de résoudre diverses questions sur la température des mélanges, quand il n'y a pas d'action chimique ; nous en indiquerons quelques-unes :

1° On mêle 10k d'eau à 30° avec 25k d'eau à 60° ; on demande la température du mélange. Si nous négligeons la chaleur absorbée par le vase et perdue pendant l'opéra-

tion, l'équation des quantités de chaleur (A) (1146) devient simplement

$$10 \times 30 + 25 \times 6 = (10 + 25)\,\theta, \text{ d'où } \theta = 12^\circ, 8 ;$$

2° Quelles quantités d'eau à 100° et à 10° faut-il mêler pour former 200^k à 30° ? Soit m le poids de l'eau à 100°, on a

$$100\,m \times 10\,(200 - m) = 200 \times 30, \text{ d'où } m = 44^k \tfrac{4}{9} ;$$

3° Quelle température prendront $0^k,2$ d'eau à 60° si on les verse dans un vase de porcelaine à 10° pesant $0^k,4$? En supposant à la porcelaine la même chaleur spécifique qu'à la silice et à l'alumine, c'est-à-dire 0,2, l'équation (A) donne $\theta = 24^\circ$.

4° Quand on plonge un thermomètre dans une petite masse d'eau, on a en général une indication erronée puisque l'instrument absorbe de la chaleur; mais on peut obtenir la véritable température en tirant t d'une équation analogue à (B) (1146), avec un terme de plus pour avoir égard à la fois au mercure et au verre du thermomètre dont les poids sont supposés connus.

1152. Il faut observer que le chiffre qui représente la chaleur spécifique du fer, par exemple, représente aussi le poids de l'eau, qui exigerait la même quantité de chaleur qu'un kilogramme de fer, pour varier d'un degré. Par exemple, 1^k de fer à 1° contient 0,11 d'unité de chaleur et $0^k,11$ d'eau également à 1° en contiennent la même quantité. On voit d'après cela que l'équivalent de 3^k de fer, sous le rapport de la chaleur, sera $0^k,33$ d'eau, et qu'en général, si on appelle m le poids d'un corps et c sa chaleur spécifique, mc sera *l'équivalent en eau*, c'est-dire le poids de l'eau capable d'absorber ou de rendre la même chaleur. Si, par exemple, une chaudière en fer pèse 100^k, elle absorbera autant de chaleur que 11^k d'eau, pour s'élever à la même température. Equivalents en eau.

1153. MM. Dulong et Petit ont reconnu qu'il fallait la même quantité de chaleur pour faire varier d'un degré la température des atomes des corps simples solides. Soit p Chaleur des atomes. Loi de Dulong.

le poids inconnu de l'atome d'oxigène ; par diverses considérations on arrive, en chimie, à connaître les poids relatifs des autres atomes ; par exemple, on a

2,01 p pour le poids de l'atome de soufre ;
3,39 p pour le poids de l'atome de fer ;
etc.

Or 2,01 p étant un certain poids en kilogr., si on le multiplie par 0,188 chaleur spécifique du soufre, on aura la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température de l'atome de soufre ; on trouve ainsi 0,378 p. Pour le fer 0,373 p, pour le plomb 0,379 p, et en général des nombres si voisins qu'on peut attribuer leurs différences aux erreurs inévitables dans les expériences.

Il paraît, d'après les recherches de MM. Avogrado et Neuman, que l'égalité de chaleur des atomes a lieu dans d'autres classes de corps, quoique la quantité varie d'une classe à l'autre. Le fait est certain pour les gaz simples d'après les recherches mêmes de M. Dulong.

Chaleur spécifique au-dessous de 0°.

1154. La chaleur spécifique est moindre dans les basses températures ; cependant pour de certaines limites, et surtout quand il n'y a pas de changement d'état, on peut admettre au-dessous de 0° les nombres trouvés au-dessus.

Chaleur spécifique de la glace.

1155. La chaleur spécifique de la glace est sensiblement moindre que celle de l'eau, c'est-à-dire qu'il faut moins de chaleur pour élever un morceau de glace de — 10° à — 9°, que pour faire varier d'un degré la température de l'eau qui en résulte. On peut mesurer la chaleur spécifique de la glace par la méthode des mélanges, en remplaçant l'eau par l'alcool refroidi à 10°, et en y plongeant un vase fermé rempli de glace à — 20° par exemple. Soit M le poids de l'alcool, C sa chaleur spécifique, T le nombre de degrés dont sa température s'est abaissée, MCT sera la chaleur cédée à la glace. Soit M′ le poids de la glace, C′ sa chaleur spécifique, T′ le nombre de degrés dont sa température s'est élevée, M′ C′ T′ sera la chaleur reçue ; l'équation $MCT = M'C'T'$ donnera C′, qu'on a trouvé ainsi égal à 0,92. Un autre mode d'expérience a donné 0,72 ;

ainsi tout ce qu'on peut affirmer, c'est que la chaleur spécifique de la glace est d'un dixième environ plus petite que celle de l'eau.

1156. Les expériences de MM. Dulong et Petit ont montré que la chaleur spécifique croissait avec la température, c'est-à-dire qu'il fallait moins de chaleur pour porter un corps de 0, à 100°, que de 100 à 200°, et à plus forte raison de 200 à 300°. Ils opéraient par la méthode des mélanges; les substances qu'on devait plonger dans l'eau froide étaient échauffées dans un bain d'huile. Voici les résultats de leurs expériences : Chaleur spécifique au-dessus de 100°.

	Chaleur spécifique moyenne	
	Entre 0 et 100°	Entre 0 et 300°
Verre.	0,177	0,190
Cuivre.	0,0940	0,1013
Zinc.	0,0927	0,1015
Argent.	0,0557	0,0611
Antimoine.	0,0507	0,0547
Platine.	0,0335	0,0355
Mercure.	0,033	0,035

Pour le fer,	entre 0 et 100°	0,1098
	0 et 200	0,1150
	0 et 300	0,1218
	0 et 350	0,1255

1157. Quand on mesure une très haute température par la méthode des mélanges, on doit avoir égard à l'accroissement de la chaleur spécifique, ce qui peut se faire approximativement. Admettons, par exemple, que de 0° à la chaleur rouge la chaleur spécifique du fer soit de 0,15, et supposons qu'une masse de fer de 1 k chauffée dans un fourneau dont on veut connaître la température ait produit une élévation de 18° dans une masse d'eau de 10k. Il s'ensuit que le fer a donné 180 unités de chaleur; comme il lui faut 0,15 d'unité pour varier d'un degré, on aura évidemment l'abaissement qu'il a éprouvé en cherchant combien de fois 0,15 est contenu dans 180. On trouve ainsi 1200°, de sorte que si l'eau est actuellement à 30°, la température du fourneau Mesure des hautes températures par la méthode des mélanges.

peut être évalué à 1230°; l'équation (A)(1146) indique la marche à suivre pour le calcul en général. En faisant deux expériences sur des masses différentes, on aurait deux expressions de la même température entre lesquelles on pourrait éliminer la chaleur spécifique inconnue qui se trouverait même ainsi déterminée; mais il faudrait tenir compte de la perte considérable de chaleur entraînée par la vaporisation de l'eau (1201).

§ II. *Chaleur spécifique des gaz et des vapeurs.*

Appareil pour mesurer la chaleur spécifique des gaz (à force constante).

1158. Pour mesurer la chaleur spécifique des gaz, on fait passer très lentement un courant de gaz chaud à travers un poids connu d'eau froide; par la disposition de l'expérience on arrive au même résultat que s'il s'établissait une température moyenne par le mélange d'un corps chaud avec un corps froid, de sorte qu'on rentre dans la méthode des mélanges. On a une idée de l'appareil, en imaginant qu'un gazomètre fait avec le vase de Mariotte (579) donne un courant uniforme de gaz, qui après s'être desséché dans un tube A de chlorure de calcium, traverse un autre tube B où arrive continuellement de la vapeur d'eau bouillante. Le gaz ainsi échauffé parcourt un serpentin S plongé dans de l'eau froide. Un écran E préserve le serpentin de l'échauffement; le tube *b* donne issue à la vapeur liquéfiée. Avec des thermomètres on mesure la température du gaz à l'entrée et à la sortie.

Fig. 331.

Application à l'air.

1159. Dans une expérience relative à l'air il y avait $0^k,580$ d'eau dans le serpentin. Celui-ci était en cuivre, et pesait tout entier $0^k 4$; il équivalait donc à $0^k,038$ d'eau (1152) et les choses se passaient comme si on avait eu $0^k,618$ de ce liquide. L'air employé jaugé d'après son volume pesait $0^k,109$; il traversait le serpentin assez lentement pour donner toute sa chaleur à l'eau, de manière qu'il avait en sortant la même température qu'elle, 8° d'abord, puis 12° à la fin. Le gaz entrait à 95°, le refroidissement à ces deux instants était donc de 87° et de 83°; mais comme dans l'intervalle il se faisait uniformément, on peut

supposer qu'il a été de 85° pendant toute l'expérience. D'après cela, si on désigne par c la chaleur nécessaire pour faire varier 1k d'air de 1°, on aura $c \times 85 \times 0{,}109$ pour la chaleur donnée ; la chaleur reçue est $4 \times 0{,}618$; ces deux quantités sont égales : donc $c = 0{,}267$, c'est-à-dire que la chaleur spécifique de l'air est à peu près le quart de celle de l'eau.

1160. Nous avons dit que les choses se passaient comme si le refroidissement du gaz avait été de 85° pendant toute l'expérience; en effet, soit m le poids du gaz sortant du serpentin pendant la première seconde, a son abaissement de température, qu'on peut supposer de 87°, c sa chaleur spécifique ; mac sera la chaleur donnée à l'eau par cette portion de gaz. Pour la deuxième seconde on aura $m\,a'\,c$, pour la 3e $m\,a''\,c$, etc., m ne changeant pas sensiblement, puisque le courant est uniforme et le changement de volume toujours à peu près le même. Dès lors la totalité de la chaleur abandonnée par le gaz est $m\,c\,(a + a' + a''..)$. Mais dire que le refroidissement est uniforme, c'est dire qu'à chaque seconde il y a une même fraction de degré de différence dans l'abaissement ; les quantités $a\ a'\ a''$ etc., forment donc une progression arithmétique dont la somme est $\left(\frac{87+83}{2}\right) n = 85\,n$ en désignant par n le nombre des termes, c'est-à-dire le nombre de secondes qu'a duré l'expérience. Mais il est évident que $m\,n$ est la masse entière du gaz ou 0k,109 ; donc la chaleur donnée à l'eau est bien $c \times 85 \times 0{,}109$, comme nous l'avions supposé.

On a le droit de supposer à l'air une température constante.

1161. Les expériences de ce genre durent environ 10′ ; mais par la méthode de compensation due à Rumford on n'a pas à tenir compte de la perte de chaleur. Après avoir déterminé par un essai préalable les températures extrêmes du serpentin, on opère à une température moyenne. Dans le cas précédent on s'était arrangé pour que l'air de l'appartement fût à 10° ; de cette manière le serpentin d'abord à 8° recevait pendant les 5 premières minutes précisément autant de chaleur qu'il en recevait pendant les 5 dernières. Cela résulte de la loi de Newton, comme nous le verrons bientôt et d'un raisonnement analogue au précédent.

Methode de compensations pour éviter la perte de chaleur.

Résultats pour les gaz autres que l'air.

1162. Nous avons pris l'air comme exemple; mais on opère de même pour les autres gaz. Plus loin nous donnerons leurs chaleurs spécifiques résultant des expériences de M Dulong (1168) : nous dirons seulement ici que les gaz les moins denses sont ceux qui en général absorbent le plus de chaleur. Pour les gaz simples en particulier, ou les mélanges de gaz simples, il y a cette loi remarquable que la chaleur spécifique est proportionnelle au volume ; nous supposons toujours le poids égal et la pression constante. Ainsi l'hydrogène, qui occupe un volume 16 fois aussi grand que l'oxigène, exige une chaleur 16 fois aussi grande pour prendre la même température ; c'est du reste de tous les corps connus celui qui absorbe le plus de chaleur à poids égal; 1_k d'hydrogène pour varier de 1° demande près de 4 unités de chaleur.

Chaleur spécifique d'un litre de gaz.

1163. Ayant la chaleur spécifique d'un kilog. d'air, il est facile de calculer celle d'un litre ; car s'il s'agit d'air à 0° sous $0^m,76$, on aura 770^l dans 1^k, et par conséquent il n'y a qu'à diviser 0,267 par 770. On trouve ainsi que $\frac{1}{2885}$ d'unité de chaleur suffit pour faire varier de 1° la température d'un litre ; de sorte qu'à volume égal et à la même température, l'air contient 2885 fois autant de chaleur que l'eau. Cela fait concevoir comment certains hommes peuvent rester quelques instants dans des étuves ou des fours chauffés à près de 100°. On voit que c'est tout autre chose que de se plonger dans l'eau bouillante, quoique la température soit la même.

A volume égal les gaz simples ont la même chaleur spécifique.

1164. En calculant la chaleur spécifique d'un litre pour les autres gaz, comme nous venons de le faire pour l'air, on trouverait qu'elle est plus grande en général dans ceux qui sont plus denses. Quant aux gaz simples, il est évident qu'ils ont la même chaleur spécifique à volume égal, car nous savons, par exemple, qu'il y a 16 fois autant de chaleur dans 16 litres d'hydrogène que dans 1^l d'oxigène, quoique les poids soient égaux (1162).

Influence de la densité.

1165. En mesurant la chaleur spécifique de l'air condensé avec un appareil qui différait du précédent seulement en ce que la pression atmosphérique y était aug-

montée, MM. Delaroche et Bérard ont reconnu que la chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'un litre de gaz était plus grande quand le gaz était plus dense, mais sans être cependant tout-à-fait double quand la densité était doublée. Il en résulte qu'une même quantité de chaleur produit sur un poids déterminé de gaz une moins grande élévation de température, s'il est dilaté, que s'il est condensé, c'est-à-dire que la chaleur spécifique à poids égal diminue quand la densité augmente.

1166. Par la disposition de l'appareil dont nous nous sommes servis, le gaz peut se dilater à mesure qu'il s'échauffe, et comme il fait toujours équilibre à la pression atmosphérique qui ne change pas pendant l'expérience, on voit que la chaleur spécifique que nous avons mesurée est celle d'un gaz qui conserve la même force élastique. Nous allons maintenant considérer le cas d'un gaz enfermé de manière à ne pas pouvoir se dilater. Il est certain d'abord que la chaleur nécessaire pour faire varier de 1° sa température est moindre dans ce dernier cas que dans l'autre. Cela résulte de ce que les gaz, ainsi que nous le verrons, se refroidissent en se dilatant (1174). En admettant ce principe, on voit bien qu'un litre d'air pris à 0°, et dont nous aurions porté la température à 1° sans lui permettre de changer de volume, n'aurait plus assez de chaleur pour rester à 1° dès qu'il viendrait à se dilater en vertu de son accroissement de force élastique.

Distinction entre les chaleurs spécifiques à force constante et à volume constant.

Celle-ci est moindre.

1167. Il n'y a pas de procédé bien exact pour mesurer directement la chaleur spécifique des gaz à volume constant, mais on en obtient indirectement une mesure très précise à l'aide d'une relation due à Laplace, et dont M. Dulong a le premier tiré parti. Si pour un même gaz on désigne par C et c les chaleurs spécifiques à force constante et à volume constant ; par V et v les vitesses du son dans ce même gaz, l'une réelle, l'autre calculée par la formule de Newton (805) qui la donne toujours plus petite, on a la proportion

Moyen de la mesurer.

$$C : c :: V^2 : v^2.$$

Pour l'air à 0° sous $0^m,76$, $V = 333^m$; $v = 279^m$;

$C = 0{,}267$: donc $c = 0{,}188$. Ainsi, pour élever de 1° la température de 1^k d'air, il ne faut pas $\frac{1}{5}$ d'unité de chaleur s'il n'y a pas de dilatation, tandis qu'il en faut plus de $\frac{1}{4}$ lorsque l'air se dilate de manière à conserver la même force élastique.

Les gaz simples ont la même chaleur spécifique à volume constant.

1168. Ayant déterminé la vitesse du son dans les autres gaz (776), M. Dulong a pu calculer leur chaleur spécifique à volume constant, en multipliant celle à force constante par le rapport $\frac{V^2}{v^2}$; il a trouvé aussi qu'elle était encore la même pour les gaz simples (1165). Quant aux gaz composés, voici les résultats obtenus en prenant pour unité la chaleur spécifique de l'air à volume constant :

Chaleur spécifique des gaz composés à volume constant.

Oxide de carbone	1,
Protonide d'azote	1,227
Acide carbonique	1,249
Hydrogène bicarboné	1,754

La différence entre les deux chaleurs spécifiques est la même pour tous les gaz.

1169. En calculant par rapport à la même unité les chaleurs spécifiques à force constante, M. Dulong a reconnu qu'elles ne différaient des précédentes que par l'addition du nombre constant 0,421, et que cette loi se vérifiait pour les gaz composés comme pour les gaz simples. Ainsi, pour l'air, on a 1,421, pour le protoxide d'azote, 1,648, etc.

Loi d'Avogrado.

1170. M. Avogrado a trouvé qu'en prenant toujours pour unité la chaleur spécifique d'un gaz simple à volume constant, celle des gaz composés était égale à la racine carrées des nombres d'atomes simples formant l'atome composé ; en effet, les résultats ainsi obtenus diffèrent peu de ceux consignés dans le tableau précéden t.

Ozide de carb. $= \frac{1}{2}$ Oxig. $+ \frac{1}{2}$ Carb. .... $\sqrt{\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}} = 1$

Prot. d'az. $= 1$ Az $\times \frac{1}{2}$ Oxig. .... $\sqrt{1 + \frac{1}{2}} = 1{,}225$

Acide carb. $= 1$ Oxig. $+ \frac{1}{2}$ Carb. .... $\sqrt{1 + \frac{1}{2}} = 1{,}225$

Hydr. bicarb. $= 2$ Hydr. $+ 1$ Carb. ... $\sqrt{2 + 1} = 1{,}732$.

Le rapport

1171. Nous savons que la vitesse réelle du son reste

la même dans un gaz dense ou raréfié (654); d'un autre côté, la vitesse calculée par la formule de Newton ne dépend pas de la densité non plus; par conséquent on peut affirmer que le rapport C : *c* des deux chaleurs spécifiques d'un gaz ne change pas quand on change la densité (1167).

des chaleurs spécifiques d'un gaz est indépendant de la pression.

1172. On a fait peu d'expériences sur la chaleur spécifique des vapeurs. Pour la vapeur d'eau, M. Dulong adopte provisoirement $\frac{1}{2}$ quand la pression est constante, et $\frac{1}{3}$ quand le volume est constant. La chaleur spécifique de l'eau liquide est ici prise pour unité, et la vapeur est supposée avoir la densité que lui donnerait le calcul a 0° sous $0^m,76$. En calculant les chaleurs spécifiques par la loi d'Avogrado, on tombe sur 0,5 et 0,37.

Chaleur spécifique de la vapeur d'eau à force constante et à volume constant.

CHAPITRE VII.

CHALEUR LATENTE.

§ I. *Chaleur absorbée par la dilatation et dégagée par la compression.*

1173. En général, quand une substance augmente de volume, soit par une simple dilatation, soit surtout par un changement d'état, il disparaît une quantité de chaleur souvent très considérable; au contraire, il se produit de la chaleur quand les changements de volume ou d'état ont lieu en sens inverse; on admet même en principe que la chaleur qui reparaît est précisément égale à celle qui avait disparu, à laquelle d'après cela on donne le nom de chaleur *latente*. Quoique ce principe soit fondé plutôt sur des vues théoriques que sur des expériences directes, il s'accorde assez bien avec les faits connus pour qu'on puisse le regarder comme vérifié.

Phénomène de la chaleur latente.

Principe général.

1174. Nous examinerons d'abord le phénomène de la

Froid pro-

duit par dilatation des gaz. chaleur latente dans les changements de volume des gaz. Si on établit le thermomètre de Bréguet (894) sous le récipient de la machine pneumatique, et qu'on donne brusquement deux ou trois coups de piston, on voit que la raréfaction de l'air produit un refroidissement considérable, comme de 20 ou 30°. Ce froid ne dure pas, parce que les parois du récipient réchauffent l'air presque aussitôt; voilà même pourquoi on ne peut pas se servir du thermomètre à mercure, qui aurait à peine le temps de descendre de 1 ou 2°.

Chaleur produite par la compression. 1175. Quand l'équilibre de température est rétabli et qu'on laisse rentrer l'air brusquement, il y a un dégagement de chaleur qui fait marcher l'aiguille de 20 ou 30° en sens inverse, de sorte que si l'air pouvait ne rien recevoir des corps environnants dans le premier cas, la compression lui rendrait certainement toute la chaleur que la raréfaction lui fait perdre.

Applications. Froid des hautes régions. 1176. Nous indiquerons quelques phénomènes remarquables qui résultent du froid et de la chaleur que produisent les changements de volume des gaz. Nous savons qu'il règne un très grand froid dans les hautes régions (877); cela tient surtout à ce que l'air ne s'échauffe que par son contact avec les corps solides ou liquides, et non par les rayons qui le traversent, se refroidit à mesure qu'il se dilate en montant. Une masse d'air à 20° tomberait tout à coup à 44°, si on la transportait à une hauteur telle que son volume fût doublé (1186). Cette dilatation aurait lieu à 6000^m environ; or, puisqu'à cette hauteur la température est — 8° à peu près, il faut que l'air ait emprunté aux couches inférieures ainsi qu'aux flancs des montagnes assez de chaleur pour relever sa température de 36°. Sans doute il faut peu de chaleur pour élever de 1° un volume d'air considérable, mais les corps qui peuvent l'échauffer deviennent plus rares à mesure qu'on s'élève; elles doivent donc être plus refroidies : aussi les pics isolés qui pointent dans les hautes régions sont-ils immédiatement dépouillés de la chaleur qu'ils reçoivent du soleil par la couche immense d'air qui se trouve à leur niveau.

1177. Dans certaines mines il s'échappe par des fissures des jets d'air tellement froids, que les corps qu'on leur présente se couvrent en quelques instants d'une couche de neige. On produit le même phénomène en laissant échapper du chalumeau à gaz (561) de l'air comprimé à 2 ou 3 atmosphères et saturé d'humidité : une petite boule de verre qu'on expose dans le jet se couvre de glace ; le froid vient évidemment alors de la dilatation qu'éprouve le gaz en pénétrant dans l'atmosphère ; mais il est remarquable que ce froid puisse aller jusqu'à congeler la vapeur d'eau. La chaleur absorbée par la dilatation explique encore pourquoi la vapeur qui s'échappe par la soupape d'une chaudière à haute pression est à peine tiède à quelque distance de l'ouverture, tandis qu'à la même distance un jet de vapeur à basse pression est encore brûlant.

Neige artificielle.

Refroidissement de la vapeur.

1178. Quand on comprime assez vivement un gaz pour que la chaleur produite n'ait pas le temps de se perdre dans les corps environnants, on obtient facilement des élévations de température de 4 à 500°. C'est là-dessus qu'est fondé le briquet à air, espèce de tube en verre ou en cuivre, dans lequel on comprime l'air brusquement avec un piston portant un peu d'amadou qui s'allume ainsi ; et même sans amadou, il se produit souvent de la lumière, qui, comme M. Thénard l'a prouvé, est due à l'inflammation des corps gras qui garnissent le piston.

Briquet à air.

1179. Il est évident que les gaz ne suivent plus la loi de Mariotte, quand on les comprime ou qu'on les dilate brusquement. Dans le premier cas, la chaleur dégagée fait que leur force élastique est plus grande que ne le suppose la loi ; dans l'autre cas, c'est le contraire. Dans les appareils ordinaires, le gaz revient si vite à sa température primitive, qu'on ne s'aperçoit guère des différences ; mais l'accroissement d'élasticité devient sensible dans les alternatives de condensation et de dilatation qui constituent le son, dont la vitesse se trouve à cause de cela d'un sixième environ plus grande que ne l'indique la formule de Newton fondée tout simplement sur la loi de Mariotte (803).

Loi de Mariotte en défaut.

1180. Les changements de température que présentent

De quoi dé-

pendent les changements de température dans les changements de volume des gaz.

les gaz, pendant leurs changements de volume, résultent de ce que leur chaleur spécifique devient de plus en plus grande, à mesure qu'ils se raréfient; de sorte que la chaleur contenue dans une masse déterminée d'air dilaté se trouve, dès qu'il y a compression, plus que suffisante pour maintenir la température au même point. Nous verrons d'ailleurs que la différence des chaleurs spécifiques suffit pour rendre compte des hautes températures qu'on peut obtenir.

Mesure de la chaleur produite dans un cas particulier.

1181. Pour mesurer la chaleur dégagée par la compression, considérons d'abord un litre d'air à 0° sous $0^m,76$; il lui faut, comme nous savons, $\frac{1}{2885}$ d'unité de chaleur pour s'élever de 1° en se dilatant de $\frac{1}{267}$, cas auquel il conserve la même force élastique. Mais $\frac{1}{4100}$ lui aurait suffi, si son volume n'eût pas changé (1167). Donc, si par la compression on ramène l'air à son volume primitif, il y aura un excès de chaleur égal à $\frac{1}{685} - \frac{1}{4100}$, en vertu duquel la température s'élèvera d'autant de degrés que cette chaleur contient de fois $\frac{1}{4100}$, c'est-à-dire de 0°,421.

Élevation de température qui en résulte.

La chaleur dégagée est la même pour tous les gaz.

1182. Puisque la chaleur dégagée par la compression est la différence $C - c$ des deux chaleurs spécifiques, il est clair qu'elle est la même pour tous les gaz (1169), d'après la loi de Dulong. Quant à la température qui en résulte, elle a pour expression $\frac{0°,421}{c}$, c'est-à-dire qu'elle est une raison inverse de la chaleur spécifique à volume constant; pour l'hydrogène bicarboné, elle serait seulement 0°,296.

L'élévation de température est différente. Sa mesure.

Accroissement d'élasticité par une compression de $\frac{1}{267}$

1183. On calcule aisément l'accroissement réel d'élasticité qui résulte d'une compression brusque de $\frac{1}{267}$; pour l'air, par exemple, l'élasticité augmente comme si la température était portée de 0°, à 1°,421, ce qui donne $\frac{1421}{267}$ pour l'accroisssement (940).

Pour une compression quelconque.

1184. Dans tout ce qui précède nous n'avons considéré qu'un cas très particulier, celui où le gaz est comprimé de $\frac{1}{267}$ de son volume à zéro; de plus nous avons supposé sa température de 1° et sa force élastique de $0^m,76$; mais au moyen de deux formules dues à Laplace, on peut calculer

approximativement l'élasticité et la température d'un gaz quelconque comprimé d'une quantité quelconque. Soient f, f', d, d' les forces élastiques et les densités avant et après la compression, on a

$$\frac{f}{f'} = \left(\frac{d}{d'}\right)^k \qquad (A)$$

k étant le rapport entre les chaleurs spécifiques à force constante et à volume constant pour le gaz que l'on considère ; pour les gaz simples $k = 1{,}421$.

1185. Soient maintenant t et t' les températures avant et après la compression, on aura

Elévation de température par une pression quelconque.

$$t' = (267 + t)\left(\frac{d'}{d}\right)^{k-1} - 267 \qquad (B)$$

Si, par exemple on prend de l'air à 0° et qu'on réduise son volume au 5ᵉ, on a

$$t' = 267\left[(5)^{0.421} - 1\right] = 267 \times 0{,}97 = 259°;$$

Si t n'est pas nul, il vient

$$t' - t = 259° + 0{,}97\,t,$$

d'où l'on conclut que l'accroissement de température dépend de la température initiale, et qu'il augmente avec elle ; pour $t = 20°$ on aurait $t' = 298°$ et non pas seulement 279. Il suffit à la rigueur de réduire à l'air au 5ᵉ pour enflammer l'amadou.

1186. La formule (B) donne aussi la température, qui résulte d'une dilatation quelconque. Quelle température, par exemple, prendrait une masse d'air à 20°, si on doublait son volume ? On a

Refroidissement pour une dilatation quelconque.

$\log.\,(267 + t') = \log.\,287 - 0{,}421 \log.\,2 = \log.\,214{,}3$
d'où $t' = -43°{,}7$.

§ II. *Chaleur absorbée par la fusion et dégagée par la solidification.*

1187. Le rôle de la chaleur latente, dans les change-

Chaleur latente pendant

les changements d'état. ments de volume des solides et des liquides, est peu marqué, et surtout trop peu connu pour que nous en parlions ici. Nous nous occuperons donc maintenant de la chaleur qui disparaît pendant les changements d'état.

Chaleur nécessaire à la fusion de la glace. 1188. Nous savons déjà (967) que les corps pour se fondre absorbent une quantité de chaleur très considérable, qui ne produit aucune élévation de température. Il nous reste à voir comment on mesure cette chaleur de fusion. Imaginons un bloc de glace contenant une cavité A, qu'on peut fermer exactement par un épais couvercle de glace. Ce bloc, mis dans une chambre où il ne gèle pas, atteint d'abord la température de 0°, puis la fusion commence. Or, si on essuie la cavité, et si le couvercle joint exactement, on verra que la glace ne fond qu'à l'extérieur du bloc, et on ne trouvera pas au bout de plusieurs heures une seule goutte de liquide en A. Ainsi arrivée à 0°, la glace ne transmet plus la chaleur ; toute celle qu'elle reçoit est employée à la fondre couche par couche. Cette propriété étant bien constatée, versons en A 1^k d'eau à 75° du thermomètre centig. à mercure ; au bout de 2 ou 3^h nous trouverons 2^k d'eau à 0°, et rien de plus, quelque temps que nous attendions encore. Nous conclurons de là que 1^k de glace à 0° demande 75 unités de chaleur pour se fondre sans changer de température (1141).

Fig. 834.

A la rigueur on pourrait décomposer les 75 unités de chaleur en deux parties, dont l'une serait pour la fusion proprement dite, et l'autre pour compenser la différence de chaleur spécifiqne de la glace et de l'eau.

Applications. Mesure de la chaleur en général. 1189. Un des meilleurs moyens de mesurer une quantité donnée de chaleur consiste à déterminer le poids de la glace que cette chaleur peut fondre. Pour faire les calculs il suffit de se rappeler que la fusion de $\frac{1^k}{75}$ répond à une unité de chaleur.

Mesure de la chaleur spécifique par le calorimètre de glace. 1190. Le vase de glace dont nous venons de nous servir a été employé pour mesurer les chaleurs spécifiques ; il est même connu, à cause de cet usage, sous le nom de *calorimètre de glace*. Si nous voulons, par exemple, mesurer

la chaleur spécifique du fer, nous en prendrons un poids connu, 5^k je suppose, et, après avoir porté sa température à 100°, nous l'enfermerons dans le calorimètre. Ayant recueilli avec soin l'eau provenant de la glace fondue, nous trouverons que son poids s'élève à $0^k,733$ ce qui répond à $75 \times 0,733$ ou 55 unités de chaleur à très peu près. Un seul kilog. de fer n'en eût donné que 11, et seulement 0,11 si la température n'eût baissé que de 1°; donc 0,11 est la chaleur spécifique du fer. On voit qu'en représentant par m' le poids de la glace fondue, par m le poids de la substance que l'on considère, par t la température, et par c la chaleur spécifique, on a

$$c = \frac{75m'}{mt}.$$

1191. Le calorimètre de Lavoisier et Laplace n'est pas autre chose que le calorimètre de glace imité aussi parfaitement que possible avec de la glace pilée, qu'on entasse dans un vase en fer-blanc à compartiments contenus les uns dans les autres. La couche intérieure, préservée par l'autre, ne fond que par la chaleur du corps sur lequel on opère. La double enveloppe qui la contient se terminant en entonnoir, on peut à l'aide d'un robinet laisser l'eau s'écouler à la fin de l'expérience; mais il est difficile de tout recueillir, à cause de ce qui reste pour mouiller la glace. Les expériences durent de 15 à 20 heures; pour les accélérer, on met un peu de glace bien égouttée sur le corps chaud dans la cavité intérieure. Quand la substance a une action chimique sur l'eau, on la met dans un vase et on tient compte de la glace fondue par le vase, soit au moyen d'une expérience préalable, soit par l'équation (1190) qui donne $m' = \frac{mct}{75}$ Si, par exemple, on s'est servi d'un flacon de verre chauffé à 100° et pesant $0^k,1$, comme $c = 0,177$ on a $m' = 0^k,023$, à un gramme près.

Calorimètre de Lavoisier et Laplace.

Manière d'opérer.

1192. Quand on connaît la chaleur nécessaire pour fondre la glace, il est facile de calculer la température des mé-

Questions sur les mélanges d'eau et de glace.

langes de glace et d'eau. On peut considérer 1^k de glace, de glace à 0° comme ayant une chaleur négative de 75 unités ; on rentre ainsi dans le cas des mélanges d'eau chaude et d'eau froide (1151), et on a la formule :

$$mt - 75\,m' = (m + m')\,\theta$$

m est le poids de l'eau, t sa température, m' le poids de la glace, et θ la température du mélange ; nous examinerons 3 cas.

1° Si $m\,t > 75\,m'$, toute la glace se fond ; il reste un excédant de chaleur, et θ donne la température du mélange. Par exemple, avec 1^k d'eau bouillante et 1^k de glace on aura 2^k d'eau à 12°, 5. La chaleur de m' tirée de ces formules donne le poids de glace nécessaire pour refroidir une masse d'eau à un degré donné. Quelle quantité de glace faut-il pour ramener à 5° 12 litres d'eau qui sont à 25°? on a

$$m' = m\left(\frac{t - \theta}{75 + \theta}\right) = 12^k\left(\frac{25 - 5}{75 + 5}\right) = 3^k$$

2° Si $m\,t = 75\,m'$, toute la glace se fond et le mélange est à 0°. Ce serait le cas de 1^k de glace mêlé avec 3^k d'eau à 25°

3° Si $m\,t < 75\,m'$, la température reste à 0°, mais toute la glace n'est pas fondue : on a $p = \frac{mt}{75}$ pour le poids de celle qui peut l'être (1191) ; on trouve ainsi qu'en mêlant de l'eau à 50° avec un poids égal de glace, les $\frac{2}{3}$ de celle-ci seraient fondus.

Chaleur dégagée pendant la formation de la glace.

1193. Nous savons qu'il se dégage de la chaleur pendant la congélation de l'eau (973), et d'après le principe relatif à la chaleur latente (1173), nous voyons qu'il s'en dégage 75 unités pour 1^k seulement. Cela explique la lenteur que nous avons remarquée dans la congélation, même par un temps très froid et la permanence de la température à 0° pendant tout le temps que la glace se forme. Il y a évidemment alors dans l'eau même une provision de chaleur qui ne s'épuise que peu à peu. Pour que la con-

gélation se fît instantanément dans la masse entière, il faudrait que la température fût descendue au moins à 75° au-dessous de zéro. Aussi, dans les hivers les plus rigoureux on ne voit jamais à l'état de glace qu'une très petite fraction de l'eau des rivières et des lacs.

Mesure de la chaleur dégagée pendant la solidification.

1194. Les procédés pour déterminer la chaleur spécifique peuvent aussi servir à mesurer la chaleur dégagée pendant le passage de l'état liquide à l'état solide. Qu'on prenne une substance à l'instant même où elle achève de se fondre, et qu'on absorbe avec de l'eau ou de la glace la chaleur qu'elle abandonne en se refroidissant à un degré déterminé : il n'y aura plus qu'à retrancher la chaleur libre pour avoir la chaleur latente. Si, par exemple, on a constaté par la méthode des mélanges, ou par le calorimètre, que 1^k d'étain pris à son point de fusion, c'est-à-dire à 228°, a donné 23,7 unités de chaleur en s'abaissant à 28°, on retranchera 0,052 × 200 pour la chaleur due au refroidissement de l'étain solide, et il restera 13,3 pour la chaleur dégagée par la solidification. La marche générale est assez simple, comme on voit; mais l'opération est réellement très délicate, et demande des corrections multipliées. Le nombre que nous venons de citer pour l'étain est exact; pour le plomb on a seulement 5,8.

Mélanges réfrigérants. Idée qu'on doit s'en faire.

1195. Plusieurs substances, quand on les mêle, constituent, en vertu d'une action chimique, des corps véritablement nouveaux dont le point de fusion est placé très bas. Ainsi 3 parties de glace et 1 de sel marin mêlées bien intimement forment en quelque sorte une nouvelle espèce de glace dont le point de fusion est à 20° au-dessous de zéro; si on fait le mélange à une température plus élevée, une portion de la masse fond en enlevant de la chaleur au reste qui se trouve ainsi amené à la température de la fusion; puis, tant que celle-ci dure, le thermomètre demeure stationnaire à — 20°, comme il le serait à 0° dans la glace. Tout cela suppose le mélange parfait, et assez froid d'avance pour que sa chaleur ne soit pas plus grande que celle que peut absorber la fusion. Voici les mélanges frigorifiques les plus employés :

Abaissement du thermomètre.

1	Acide sulfurique à 41°...	3	de + à — 8°.
	Sulfate de soude cristallisé	4	
2	Eau..................	1	de + 10° à — 15°.
	Nitrate d'ammoniaque..	1	
3	Glace................	3	de 0° à — 20°.
	Sel marin.............	1	
4	Neige................	2	de — 20° à — 55°.
	Chlorure de calcium cristallisé...............	3	
5	Neige................	4	de — 55° à — 68°.
	Acide sulfurique étendu.	5	

Cet acide contient 2 parties d'acide concentré, 2 d'alcool et 1 d'eau.

Manière d'opérer.

1196. Pour obtenir tout l'effet indiqué, il faut que les substances soient très divisées : ainsi, les sels devront être finement pulvérisés, la glace bien pilée ; la neige non tassée serait encore préférable. Le mélange doit se faire très exactement et le plus rapidement possible, dans des vases qui ne puissent pas lui donner beaucoup de chaleur. Il est d'ailleurs nécessaire d'opérer dans un lieu frais et sur des masses un peu considérables, pour que les causes extérieures de réchauffement n'aient pas trop d'influence. Si la température est trop élevée, on rafraîchit les substances dans un mélange préalable, avant de les employer ; cela est particulièrement nécessaire pour le mélange n° 4, qui sert à la congélation du mercure ; le sel et la neige sont refroidis d'avance dans le mélange précédent.

Pour celui-ci, il n'est pas bien nécessaire de prendre le sel à 0°, pourvu que les quantités soient un peu grandes ; on peut d'ailleurs augmenter le froid en ajoutant du chlorure de calcium. C'est dans ce mélange que les limonadiers plongent les *sorbetières* qui contiennent les crèmes ou les jus de fruits, pour la préparation des glaces. Ces vases en étain ou en argent sont très minces et cannelés,

afin de présenter une plus grande surface. Le mélange n° 1 est assez économique pour faire de la glace. On opère dans une auge AB, dans laquelle on en plonge une beaucoup plus étroite en fer-blanc *ab* contenant l'eau à faire geler; on détache ensuite la glace en chauffant légèrement. Fig. 335.

1197. Un corps plongé dans un mélange frigorique même bien fait ne descend pas toujours à la température marquée dans la table : cela se conçoit en observant qu'un corps mis en contact avec une petite quantité de glace peut fort bien ne pas descendre à zéro, quoique la glace soit à cette température pendant tout le temps que dure la fusion, à plus forte raison ne faut-il pas s'imaginer que de l'eau doive nécessairement s'y geler. Un mélange d'un poids donné ne peut rendre latente, par sa fusion, qu'une quantité de chaleur déterminée ; fût-il capable de descendre à 50° au-dessous de zéro, il ne produirait pas la plus petite aiguille de glace dans 1^k d'eau à 10° s'il n'absorbe au moins 10 unités de chaleur. D'ailleurs tel mélange qui fait descendre le thermomètre plus bas qu'un autre peut fort bien, à poids égal, ne pas absorber autant de chaleur. Jusqu'à présent on s'est plutôt occupé du degré de froid rendu qu'on pourrait atteindre que de la quantité de chaleur latente; celle-ci pourrait s'évaluer par le refroidissement produit dans une masse connue d'eau, ou par le poids de la glace formée dans de l'eau prise à zéro.

Distinction entre le froid produit et la chaleur absorbée.

Moyen de mesurer celle-ci.

§ III. *Chaleur dégagée par la liquéfaction et absorbée par la vaporisation.*

1198. Pour terminer ce qui regarde la chaleur latente, il nous reste à parler de celle des vapeurs. Voyons d'abord comment on mesure leur chaleur totale. Pour l'eau, par exemple, la vapeur provenant d'une cornue où le liquide est en ébullition sera conduite dans une masse connue d'eau froide, de manière qu'elle s'y condense en entier. On rentre ainsi dans la méthode des mélanges; mais comme l'opération dure un certain temps, il faut compenser les pertes de chaleur par le procédé de Rumford (1161).

Chaleur totale des vapeurs.

Voici les résultats d'une expérience de M. Gay-Lussac : la masse d'eau froide y compris le vase évalué en eau pesait

Procédé pour la mesurer.

1^k; la température était d'abord à 10°; par la condensation de 10 grammes de vapeur à 100° elle s'est élevée à 16°,15; il y avait donc d'abord 10 unités de chaleur, puis 16,3115, d'où il suit que la vapeur en a apporté 6,3115, ce qui revient à 631,15 par kilogramme. D'après la moyenne de ses expériences, M. Dulong admet 643 unités de chaleur dans 1^k de vapeur d'eau à 100°. M. Despretz a trouvé pour l'alcool 255, pour l'essence de térébenthine 149, pour l'éther sulfurique 109. Ces vapeurs provenaient du liquide à la température de l'ébullition (1126). Avec l'appareil dont se servait M. Dulong, on pouvait mesurer la chaleur de la vapeur pour une température inférieure au point ordinaire d'ébullition. La cornue contenant le liquide s'abouchait dans un serpentin qui communiquait avec la machine pneumatique, de sorte qu'on déterminait l'ébullition à des températures très basses. La vapeur parcourait un serpentin entouré d'eau froide; à mesure qu'elle se liquéfiait, le liquide provenant de la condensation s'amassait dans un vase plongé dans la même eau que le serpentin, où il continuait à se refroidir, abandonnant ainsi toute la chaleur qu'il avait au-dessus de la température finale du mélange.

Chaleur latente. Sa mesure.

1199. De tout ce que nous venons de dire on peut conclure que quand 1^k d'eau est arrivé à 100°, il faut encore lui donner 543 unités de chaleur, uniquement pour le transformer en vapeur, sans que cela élève en rien sa température; mais à la rigueur on ne peut pas prendre ces 543 unités pour la mesure de la chaleur latente, si on entend par là celle qui constitue l'état gazeux. Celle-ci est certainement plus grande, puisque 1^k de vapeur d'eau n'a pas besoin d'une unité de chaleur pour s'élever de 1°; et si on adopte 0,5 pour la chaleur spécifique (1172), il restera 593 unités pour la chaleur latente.

La chaleur totale est sensiblement constante au-dessus de 100°.

1200. Un fait d'une haute conséquence pour l'économie des machines à vapeur, c'est que la chaleur totale de la vapeur d'eau est à très peu près la même à toute température

au-dessus de 100°, de sorte qu'il ne faut pas plus de charbon pour produire 1^k de vapeur à 5 atmosphères qu'à une seule. Dans une expérience de M. Clément Désormes on voit que 14,5 de vapeur à 152°,25 arrivant dans 290^k d'eau à 20° ont porté la température à 49°,25, d'où l'on tire 632 unités pour la chaleur totale par kilogramme, comme dans l'expérience citée plus haut. Ce résultat d'ailleurs peut se concevoir, en observant que la chaleur spécifique de la vapeur à poids égal doit diminuer à mesure que la densité augmente (1155). Si, par exemple, elle n'est plus que $\frac{1}{3}$, terme moyen entre 0 et 150°, on aura 50 unités pour la chaleur libre à cette température comme à 100°, et par suite la même somme totale, puisque la chaleur latente ne change évidemment pas. M. Dulong pense que la chaleur totale augmente un peu avec la température, mais trop peu pour qu'on ait à en tenir compte dans l'industrie.

Applications. Lenteur remarquable de la vaporisation.

1201. La grande quantité de chaleur nécessaire à la constitution de la vapeur explique pourquoi il faut tant de temps pour évaporer une masse d'eau un peu considérable dans les appareils ordinaires. Et même dans les chaudières à vapeur, avec le feu le plus violent qu'on puisse momentanément soutenir pour une expérience, on vaporise à peine en une heure 100 grammes d'eau par décimètre carré de surface de chauffe. Dans le service habituel on n'en obtient généralement pas plus de 30 ou 40, de sorte que si une chaudière doit fournir 100^k de vapeur par heure, il faut qu'elle présente à la flamme une surface de 4 mètres carrés environ. Il faut observer qu'ici les choses ne se passent plus comme pour l'évaporation à l'air; la quantité de vapeur formée dépend de l'étendue, non de la surface libre, mais de la surface chauffée. Cela se conçoit, puisque tout dépend de la quantité de chaleur que reçoit le liquide. Pourvu que la pression puisse être vaincue, il se dégagera toujours 1_k de vapeur pour 643 unités de chaleur introduite. Aussi, M. Christian a vu qu'une chaudière qui évaporait 3^k d'eau en 3' quand elle était entièrement ouverte,

Grandeur des chaudières pour fournir un poids déterminé de vapeur.

Tout dépend des surfaces de chauffe.

produisait encore le même effet quand il ne restait plus qu'un petit orifice de deux lignes de diamètre.

Chauffage à la vapeur.

1202. Pour ne pas se faire une idée fausse du chauffage à la vapeur, il faut remarquer que la vapeur ne produit pas de chaleur par elle-même: elle donne simplement ce qu'elle a reçu, et de quelque manière qu'on s'y prenne, par le chauffage direct ou autrement, il faut toujours brûler la même quantité de combustible pour obtenir un effet calorifique donné ; seulement avec la vapeur les pertes sont moindres parce qu'on n'est pas obligé de multiplier les foyers, et qu'on peut au même instant porter la chaleur partout où l'on veut. Ainsi dans les teintureries, les papeteries et divers ateliers où l'on a un grand nombre de cuves à chauffer, une seule chaudière peut suffire : il n'y a qu'un robinet à tourner pour que la vapeur amenée par un tuyau dans l'eau froide les porte en quelques minutes à l'ébullition. On n'a pas besoin de vases en métal comme dans le chauffage direct, et de plus on ne craint pas l'altération des matières qui pourraient se déposer; peu importe d'ailleurs que la chaudière à vapeur soit au-dessous ou au-dessus des cuves, la vapeur arrive toujours ; tandis qu'il faudrait des dispositions particulières ou des machines pour amener de l'eau chaude, ainsi que cela se fait encore dans les établissements de bains.

Ses avantages dans les usines.

On ne chauffe pas toujours en condensant la vapeur dans le liquide même; par exemple, pour des évaporations elle circule dans un double fond sous la chaudière ou dans un serpentin qui passe à travers le liquide.

Calorifère à vapeur.

1203. Il y a en général de l'avantage à chauffer les grands bâtiments par la vapeur; non-seulement quand on a de la vapeur de reste comme dans les ateliers où l'on emploie des machines à haute pression, mais même en établissant des chaudières qui n'ont pas d'autre usage. A Paris, la Bourse, le Théâtre-Italien, la nouvelle salle de l'Institut sont chauffés par la vapeur. On obtient ainsi dans des bâtiments très vastes une température bien plus uniforme qu'avec des calorifères à air chaud. Pour avoir une idée de ce genre de chauffage considérons un calorifère pour un édifice à trois

étages. La chaudière A est ordinairement placée dans une cave. Un tube B conduit la vapeur dans les tuyaux de *chauffe* CCC, EEE, etc., qui sont en fonte et ont 12 ou 15 centimètres de diamètre. Les verticaux s'emboîtent par des *compensateurs* DDD, de manière à pouvoir se dilater et se contracter par les changements de température sans nuire à la solidité de l'appareil. Les horizontaux, légèrement inclinés pour l'écoulement de l'eau de condensation, posent sur des rouleaux mobiles *eee*; ils sont fixés par un bout, mais par l'autre ils s'abouchent dans le tube vertical GGG, à l'aide de petits tuyaux courbes en plomb *ggg* qui leur permettent de s'allonger et de se raccourcir. Le tube GG ramène l'eau condensée dans la chaudière. On voit que ce système est fermé; mais comme la vapeur ne s'y répandrait que très lentement si l'air y restait (1079), on ouvre le robinet H dès qu'on commence à chauffer; l'air sort par là; on ferme ensuite quand la vapeur arrive. Il se fait, comme on voit, une véritable distillation. L'air s'échauffe et se renouvelle continuellement autour des tuyaux de condensation; leur température approche de 100°. Quand l'air est arrivé à 15°, il se liquéfie terme moyen 1^k de vapeur par heure pour 1 mètre carré de surface de chauffe; il y a donc environ 900 unités de chaleur transmises, qui pourraient porter 170 mètres cubes d'air de 0 à 15°; mais à cause de la ventilation nécessaire et de la chaleur absorbée par les murailles, on ne compte guère que sur le tiers de cet effet, c'est-à-dire qu'il faudrait environ 1 mètre carré de surface de chauffe pour un espace de 60 mètres cubes.

Fig. 336.

1204. Un bain de vapeur est une espèce de brouillard extrêmement chaud qu'on produit en faisant pénétrer un jet de vapeur dans un espace fermé. La saturation a lieu immédiatement, de sorte que la vapeur se condense à mesure qu'elle arrive, abandonnant sa chaleur latente à l'air et à tout ce qu'elle touche. On voit d'après cela que, toutes choses égales, on reçoit dans un bain de vapeur bien plus de chaleur que dans l'air sec; et comme en outre il n'y a pas d'évaporation possible puisque l'espace est saturé, la température de la peau s'élève si rapidement, qu'on ne peut

Bains de la vapeur.

guère séjourner qu'un petit nombre de minutes. On modère l'effet du bain en en laissant arriver la vapeur par *chauffes* d'une ou deux minutes.

Questions sur les mélanges de vapeur et d'eau.

1205. Il est facile de résoudre diverses questions surles mélanges d'eau et de vapeur en considérant que 1k de vapeur porte 643 unités de chaleur avec lui. La formule (A) (1146) devient ainsi $mt + 643\ m' = (m + m')\ \theta$, m est le poids de l'eau, t sa température, m' le poids de la glace et θ la température du mélange.

Quelle quantité d'eau à 10° faut-il mêler à 1k de vapeur pour que la température soit de 20° ? On trouve $m = 62^k,3$. Cela montre quelle quantité d'eau froide consomment les machines à condensation (1063).

Quelle quantité de vapeur faut-il condenser dans 100k d'eau à 15° pour porter le tout à l'ébullition? on a $m = 15^k,65$; c'est là le minimum, mais il faut bien compter sur 18 ou 20_k à cause de la chaleur perdue.

En posant $643\ m' - 75\ m = 0$ on voit que la vapeur et la glace, pour se liquéfier réciproquement, doivent être dans le rapport de 75 à 643, ou de à 1 à 9 à peu près.

Froid produit par l'évaporation.

1602. C'est un fait bien reconnu que l'évaporation produit du froid. Ainsi un peu d'éther versé sur la main occasionne un froid très vif, surtout si on agite pour favoriser l'évaporation : on sait que le vent paraît bien plus frais quand la peau est mouillée que quand elle est sèche ; les arrosements rafraîchissent, même quand l'eau n'est pasplus froide que le sol sur lequel on la verse.

Alcarazas.

1207. Pour rafraîchir l'eau on la met dans des vases de terre poreux appelés *alcarazas*, dont la surface se trouve toujours humide; de sorte qu'il se fait une évaporation continuelle. On obtient le même effet avec des vases en métal qu'on enveloppe de linges mouillés. On se rend parfaitement compte du froid dû à l'évaporation, quand onse rappelle que la vapeur, en se formant, absorbe de la chaleur qui devient insensible au thermomètre.

Congélation de l'eau.

1208. Une expérience de Leslie montre que la chaleur enlevée par la formation de la vapeur même froide est fort considérable. Sous le récipient de la machine pneumati-

que on met un vase très large contenant une couche de 2 ou 3 centimètres d'acide sulfurique très concentré; par-dessus on établit une capsule métallique peu profonde contenant 15 à 20 grammes d'eau; elle pose par trois pieds sur les bords mêmes du vase contenant l'acide, dont la surface reste ainsi bien à découvert. On enlève l'air, et on ferme les robinets; l'évaporation, comme nous savons, se fait très rapidement dans le vide, et ici elle ne peut pas s'arrêter parce que l'acide absorbe la vapeur à mesure qu'elle se forme: aussi, par une température de 20°, l'eau est gelée en 5 ou 6′. Comme l'évaporation continue après la congélation, la glace descend à plusieurs degrés au-dessous de zéro, on est même parvenu à congeler du mercure mis en contact avec elle. La congélation de ce métal peut se faire à l'air libre, en mouillant avec de l'acide sulfureux la boule d'un thermomètre. M. Bussy a obtenu ainsi un froid de — 57° sur le thermomètre à air, et même de — 68°, en opérant dans le vide au-dessus d'un vase contenant de la potasse humectée pour absorber l'acide. Avec l'acide carbonique liquide M. Thilorier a fait descendre le thermomètre à alcool de 20° à — 90°; c'est vers cette température que l'acide se solidifie par sa propre évaporation.

Du mercure.

De l'acide carbonique.

1209. Nous conclurons des expériences précédentes que la vapeur froide qui se forme aux plus basses températures absorbe encore une quantité de chaleur très considérable; et pour la vapeur d'eau en particulier, nous ne nous éloignerons certainement pas beaucoup de la vérité en admettant qu'à 0° elle contient presqu'autant de chaleur qu'à 100°. En effet, il est naturel de penser que la chaleur latente, c'est-à-dire celle qui est nécessaire pour constituer l'eau à l'état de gaz, reste la même aux différentes températures; on aurait déjà de cette manière 593 unités. De plus la chaleur spécifique augmente à mesure que la vapeur est moins dense: il peut donc y avoir ainsi, en partie du moins, compensation. D'après cela et d'après quelques vérifications indirectes, nous admettrons par approximation que la chaleur totale de la vapeur d'eau

Mesure de la chaleur absorbée par la vapeur aux basses températures.

est encore d'environ 600 unités dans les basses températures.

Calcul de l'évaporation capable de produire un refroidissement donné.

1210. En partant de là il est facile de calculer la perte qu'une masse donnée d'eau doit faire par l'évaporation, pour se refroidir d'un certain nombre de degrés, ou même se geler. Si on veut, par exemple, refroidir de 8° une masse d'eau pesant 3^k, il faut lui enlever 24 unités de chaleur; or $\frac{1}{600}$ de kilog. de vapeur enlève une unité, il faudra donc ici l'évaporation de $\frac{3^k \times 8}{600} = 0^k,04$. Si l'eau est alors à 0° et qu'on veuille la faire geler, on devra en vaporiser $\frac{1}{9}$; car, en supposant pour un instant qu'on ait à faire à 9^k : on voit bien que 1^k emporte en se vaporisant les 600 unités que doivent perdre les 8 autres pour passer à l'état de glace. De là il est aisé de conclure que si on désigne par x le poids de la vapeur qui doit se former pour qu'une masse m d'eau prise à la température t se congèle, on a

Calcul de l'évaporation capable de congeler une quantité donnée d'eau.

$$x = m\left(\frac{75 + t}{675}\right)$$

Remarque.

1211. Nous supposons l'évaporation assez rapide pour que les corps environnants n'aient pas le temps de restituer une quantité notable de chaleur. C'est à peu près le cas de l'expérience de Leslie, qui peut ainsi servir à vérifier si la chaleur absorbée par la vapeur est à peu près telle que nous l'avons supposé. Il suffirait d'opérer à 0° et de voir si $9^{gr.}$ d'eau à 0° se réduisent à $8^{gr.}$ au moment de la congélation.

Limite du froid produit par l'évaporation.

1212. Le froid produit par l'évaporation est limité, parce que la tension diminuant à mesure que la température s'abaisse, la quantité de vapeur formée à chaque instant diminue aussi; la chaleur perdue allant ainsi en décroissant, tandis que la chaleur reçue des corps environnants reste la même, il arrive nécessairement une époque où ces deux quantités sont égales, alors la température est stationnaire. Pour avoir une limite plus basse, il faudrait diminuer la

chaleur envoyée par les corps environnants, ou augmenter celle qui est enlevée par l'évaporation. On obtient le premier effet en opérant par un temps froid, ou en entourant l'appareil de corps très froids. Ainsi, dans l'expérience de Leslie, on obtient à coup sûr la congélation du mercure en enveloppant le récipient d'un mélange réfrigérant de glace et de sel. Quant au second effet, on l'obtient par tous les moyens qui favorisent l'évaporation sans donner de chaleur, car il ne faudrait pas s'imaginer, par exemple, qu'un thermomètre mouillé va se refroidir par l'évaporation au soleil ou devant le feu; seulement il s'échauffera moins. Considérons donc une masse liquide arrivée à sa limite de refroidissement; il est clair que cette limite s'abaissera si l'air devient plus sec, il en sera de même si on raréfie l'air, et à plus forte raison si on l'enlève ainsi que la vapeur qui se forme.

1213. La limite s'abaissera encore si on augmente la surface d'évaporation, sans augmenter celle par laquelle entre la chaleur du milieu ambiant: c'est le cas des alcarazas, comparés aux vases qui ne laissent à découvert qu'une partie du liquide; mais si déjà celui-ci avait sa surface entièrement libre, comme cela aurait lieu pour une goutte d'eau suspendue dans l'air, il n'y aurait pas d'avantage à multiplier les surfaces; on augmenterait la chaleur reçue dans la même proportion que la chaleur perdue.

Influence de la surface.

1214. Par la même raison, on ne peut pas espérer que l'agitation de l'air fera descendre la limite. Si ce fluide double l'évaporation en se renouvelant, il apporte aussi deux fois autant de chaleur. Mais si la multiplication des surfaces ou la rapidité du vent n'ont pas d'influence sur le refroidissement définitif, elles en ont une très marquée sur le temps nécessaire à ce refroidissement. Qu'on laisse en repos la boule d'un thermomètre, après l'avoir entourée d'un linge mouillé, il lui faudra peut-être un quart d'heure pour atteindre la limite du refroidissement; tandis que si on fait tourner l'instrument comme une fronde, une demi-minute suffira. Si on place les alcarazas dans des courants d'air, ou si on les fait osciller après les avoir suspendus, ce

L'air agité ne refroidit pas davantage.

Seulement il refroidit plus vite.

n'est pas pour obtenir un froid plus grand, c'est pour l'obtenir plus vite. Dans certaines brasseries, on accélère le refroidissement du moût en versant une couche de 4 à 5 pouces dans des cuviers très larges et en faisant tourner une espèce de volant tout près de la surface. Ce volant fait 120 révolutions par minute : en 2^h on refroidit ainsi 4000 litres de moût, ce qui demandait 10 heures autrefois.

La multiplication des surfaces agit de même.

1215. Quant à la multiplication des surfaces pour accélérer le refroidissement, c'est un moyen continuellement employé; ainsi on agite les liquides, on les verse de haut, etc. On sait qu'un linge mouillé se refroidit bien plus vite si on l'étend, que s'il présente peu de surface, quoiqu'il arrive toujours à la même température finale.

La limite du refroidissement est plus basse pour les liquides plus volatils.

1216. Il est évident que la limite doit être plus basse pour les liquides plus volatils, car si par exemple lorsque l'eau l'a atteinte, on remplace ce liquide par de l'éther, la chaleur reçue l'instant d'après sera de même employée tout entière à la vaporisation, sans changer la température; de sorte qu'en vertu de l'excès de tension, une nouvelle quantité de liquide devra se vaporiser aux dépens de la chaleur du reste.

Il ne s'ensuit pas qu'à poids égal ils enlèvent plus de chaleur.

1217. De ce qu'on peut pousser le froid plus ou moins avec un liquide plus volatil, il ne faudrait pas conclure qu'à poids égal il enlève plus de chaleur. Ainsi M. Thilorier pouvait à peine congeler un petit globule de mercure avec l'acide carbonique liquide, qui donne un froid de — 90°, tandis qu'avec un mélange d'éther et de cet acide dont l'évaporation était loin de produire un abaissement aussi grand, il congelait 50 grammes de mercure en quelques secondes. Un jet de ce mélange produisait sur le doigt une sensation de froid intolérable, tandis qu'avec l'acide pur, l'effet était bien plus superficiel. Tout cela se conçoit quand on se rappelle que les liquides absorbent, pour se vaporiser, des quantités de chaleur très différentes (1198); que l'eau, par exemple, en prend 6 fois autant que l'éther; de sorte que ce dernier liquide, fût-il à 100° au-dessous de zéro, absorberait, pour se vaporiser, tout au plus le tiers de ce que prendrait l'eau en partant de la température ordinaire.

1218. M. Gay-Lussac a fait une série très remarquable d'expériences sur le froid dû à l'évaporation de l'eau dans l'air sec à différentes températures. L'air sortait d'un gazomètre, se desséchait sur du chlorure de calcium, et arrivait contre la boule d'un thermomètre revêtu de batiste entretenue humide. Nous savons que la vitesse du courant est sans influence (1214), de sorte que les résultats sont vrais pour l'air calme ou agité. Froid dû à l'evaporation de l'eau dans l'air sec.

Température de l'air.	Abaissement.	Température de l'air.	Abaissement.
0°	5°,82	13°	10°,07
1	6,09	14	10,44
2	6,37	15	10,82
3	6,66	16	11,20
4	6,96	17	11,58
5	7,27	18	11,96
6	7,59	19	12,34
7	7,92	20	12,73
8	8,26	21	13,12
9	8,61	22	13,51
10	8,97	23	13,90
11	9,37	24	14,30
12	9,70	25	14,70
		30	16,74

1219. On voit par ce tableau quelle influence aurait la sécheresse de l'air sur la température de l'eau; dès que le thermomètre serait au-dessous de 8° il pourrait se former de la glace; dans une atmosphère à 30°, les surfaces humides descendraient à 13°,26. Les expériences ont été faites sous la pression $0^m,76$; mais avec de l'air raréfié, on a eu des abaissements plus grands encore. Ainsi sous une pression de $0^m,50$ par une température de 10°, le thermomètre est descendu à — 2°; c'est donc 12° d'abaissement au lieu de 8,97. Il suit de là que dans les hautes régions, à sécheresse égale, l'évaporation produit plus de froid et nous savons que la sécheresse est plus grande. Observations.

1220. Le refroidissement qu'on obtient avec les alcarazas n'atteint jamais celui qu'indique ce tableau, parce que Dans l'air humide.

l'air est toujours plus ou moins humide. On peut calculer approximativement l'abaissement à espérer en multipliant celui de la table par le complément du degré d'humidité. Si, par exemple, l'hygromètre marque 64°, le degré d'humidité est 0,41, dont le complément est 0,59; $14,7 \times 0,59 = 8°,6$ est l'abaissement à espérer en supposant l'air à 25°; ainsi l'eau pourrait descendre à 17°. Cette règle n'est applicable que pendant l'été, c'est-à-dire pour la température de 20 à 30°; on pourra d'ailleurs mesurer très vite l'abaissement possible en faisant tourner en fronde un thermomètre dont la boule sera couverte de coton mouillé.

Chaleur enlevée au globe par l'évaporation.

1221. D'après l'évaporation moyenne à la surface des eaux et du sol on voit quelle énorme quantité de chaleur se trouve ainsi enlevée; mais cette chaleur reparaît quand la vapeur repasse à l'état liquide; et, comme cela arrive surtout dans les hautes régions, il en résulte que les vapeurs contribuent puissamment à tempérer le froid qui y règne.

Chaleur enlevée aux végétaux.

1222. C'est évidemment l'évaporation qui empêche les végétaux de s'échauffer comme le feraient des substances sèches; et la chaleur ainsi absorbée est très considérable, puisque sur le *soleil* dont nous avons parlé, et qui ne pesait pas 3 liv. l'évaporation en 12 heures enlevait tant à la plante qu'à l'air ambiant, plus de 350 unités de chaleur, ce qui eût été suffisant pour faire bouillir au moins 7 livres d'eau prises à la température de la glace fondante.

Chaleur enlevée à l'homme.

1223. L'évaporation par les poumons fait perdre à l'homme environ 300 unités de chaleur par jour. L'évaporation à la surface de la peau ferait perdre plus de 500 unités, sans les vêtements qui absorbent une partie de l'humidité, à mesure qu'elle est exhalée. En admettant 600 unités pour la perte totale, on voit que sans l'évaporation, la température du corps s'élèverait de plus de 10° en un jour, car la chaleur perdue suffirait pour élever de 10° la température d'une masse d'eau de 60 k.

L'évaporation sert à régler la température.

1224. Comme l'évaporation croît et décroît avec la chaleur, c'est évidemment un régulateur de notre température. Dans une étuve chauffée à 90°, la perte de chaleur, d'a-

près ce que nous avons vu, est au moins 20 fois aussi grande que dans les circonstances ordinaires ; aussi la température du corps s'élève à peine d'un degré, du moins quand on ne reste que quelques minutes. Dans une étuve humide, c'est-à-dire chauffée par la vapeur, l'évaporation n'étant plus possible, on ne supporte pas, à beaucoup près, des températures aussi élevées. Fordyce rapporte qu'il ne put rester que quelques minutes dans une étuve humide chauffée à 49°; le thermomètre placé sous la langue marquait 43°,3, de sorte que la température du corps s'était élevée déjà de plus de 6°; le pouls donnait 145 pulsations.

CHAPITRE VIII.

PROPAGATION DE LA CHALEUR.

§ I. *Conductibilité.*

1225. Lorsqu'on chauffe un corps par une extrémité, on sait que la chaleur se propage dans le reste de la masse. On appelle *conductibilité* cette propriété qu'ont les corps de transmettre ainsi la chaleur de molécule à molécule. **Conductibilité des solides.**

1226. Sous le rapport de la conductibilité, il y a de grandes différences entre les diverses substances. Ainsi, on tient sans se brûler un morceau de bois très court dont une extrémité est enflammée, tandis qu'on ne saisirait pas impunément une barre de fer de même dimension dont un bout serait chauffé jusqu'au rouge. Par des expériences vulgaires on sait que les métaux sont de *bons conducteurs;* qu'au contraire les substances végétales et animales, le verre, la cire, etc., conduisent la chaleur difficilement. Une pièce de viande brûle quelquefois d'un côté pendant qu'elle est encore froide de l'autre. Un tube de verre peut être fondu à un bout sans s'échauffer quelques pouces plus loin. Il en est de même de la cire à cacheter, d'une bou- **Bons et mauvais conducteurs.** **Moyens ordinaires de les distinguer.**

gie ordinaire, d'un bâton de soufre, etc. L'ébullition cesse aussitôt dans un vase de métal qu'on retire du feu; elle continue au contraire dans un vase de terre, parce qu'il y reste une certaine quantité de chaleur qui n'a pas été transmise à l'eau à mesure qu'elle pénétrait dans les parois; aussi celles-ci en dehors s'élèvent-elles pendant l'ébullition à une température bien supérieure à 100°.

Sensations de froid au contact.

1227. On distingue encore les bons et les mauvais conducteurs par le froid plus ou moins vif qu'on sent en les touchant; ainsi à la même température les métaux nous paraissent bien plus froids que le bois, que la paille, que la laine, etc. Mais ici il faut observer que le phénomène est complexe; tout ce que nous sentons c'est la perte de chaleur; or la substance que nous touchons peut nous en enlever beaucoup, non-seulement parce que les molécules de la surface la transmettent rapidement aux autres, mais encore parce que ces molécules peuvent exiger beaucoup de chaleur (1145) pour se mettre en équilibre avec notre température. Voilà pourquoi le marbre paraît aussi froid qu'un métal, quoiqu'il conduise plus mal la chaleur; le verre est dans le même cas. Le poli a encore une grande influence puisqu'il permet un contact plus intime, et par suite le refroidissement d'un plus grand nombre de points.

Ordre de conductibilité. Expérience d'Ingenhouz. Fig. 337.

1228. Une expérience d'Ingenhouz fait aisément reconnaître l'ordre dans lequel les métaux et certains corps solides doivent être rangés relativement à la conductibilité. Sur une des parois d'un vase de cuivre MN, on fixe perpendiculairement de petits cylindres *a b c*... d'argent, de cuivre, de fer, de verre, de bois, etc. Ces cylindres sont parfaitement égaux et enduits d'une couche de cire. On verse de l'eau bouillante ou de l'huile très chaude dans le vase et on juge de la conductibilité par la distance où la cire se trouve fondue sur chaque cylindre à un instant donné. La fusion a déjà lieu à l'extrémité de l'argent quand elle commence à peine sur le bois. Voici l'ordre assigné par cette expérience:

Or, argent, cuivre, étain, fer, zinc, plomb, verre, marbre, porcelaine, poterie, charbon, bois.

Thermomètre de contact. Fig. 338.

1229. Pour juger de la conductibilité des substances en lames minces, des étoffes par exemple, on peut se servir du *thermomètre de contact*, imaginé par Fourier. C'est un vase ayant la forme d'un entonnoir renversé; il est fermé inférieurement par une membrane tendue et contient du mercure où plonge un thermomètre. On étend l'étoffe sur un support chauffé d'avance, et posant l'instrument par-dessus, on note le temps nécessaire pour que le thermomètre monte d'un certain nombre de degrés. En répétant l'expérience avec une autre étoffe sur le même support également chaud, et dans les mêmes circonstances, on détermine facilement laquelle des deux conduit mieux la chaleur. On trouve ainsi qu'à égalité d'épaisseur les tissus végétaux, comme le lin, le coton, etc., transmettent la chaleur plus vite que la soie ou la laine. On reconnaît que les substances filamenteuses ou divisées en parcelles sont très peu conductrices; on peut citer surtout la sciure de bois, le tan, le coton cardé, le duvet, etc. Il est aisé avec cet appareil d'étudier l'influence de l'épaisseur, de la superposition, etc. Il est à remarquer que le passage plus ou moins facile de la chaleur ne dépend pas seulement de la nature des substances et de l'épaisseur totale, mais aussi de l'ordre de superposition. Par exemple, une lame métallique entre deux morceaux de drap est sans influence, mais elle en a une très marquée quand elle est en contact avec le support ou avec l'instrument.

Mesure de la conductibilité.

1230. Avec les expériences précédentes on peut bien s'assurer qu'une substance conduit mieux la chaleur qu'une autre, mais on ne *mesure* pas la conductibilité. Cette mesure pourrait s'obtenir très exactement pour certains corps avec un appareil proposé par M. Dulong. On ferait avec la substance à éprouver un vase sphérique d'une épaisseur uniforme et connue qui plongerait dans un bain de glace fondante. On introduirait dans la cavité un courant de vapeur d'eau, de manière à entretenir la surface intérieure constamment à 100°; la surface extérieure serait toujours à 0°; et on mesurerait la conductibilité par la quantité de glace fondue dans un temps donné. Par un procédé moins direct

M. Despretz est arrivé aux résultats suivants, qui pour les dernières substances ne doivent être regardés que comme approximatifs.

Or......	1000	Fer...	374	Marbre..............	24
Platine..	981	Zinc..	363	Porcelaine............	12
Argent..	973	Étain..	304	Terre des fourneaux....	11
Cuivre..	898	Plomb.	180		

Cette table signifie, par exemple, que si dans l'appareil précédent il y a eu 898 grammes de glace fondue en opérant avec un vase de cuivre, il y en aurait dans le même temps seulement 374 avec un vase de fer de même épaisseur et de même surface.

Applications, chauffage.

1231. Dans la construction des fourneaux on a soin d'employer des substances peu conductrices pour éviter la déperdition de la chaleur; quelquefois même entre deux couches de briques on interpose une couche de charbon en poudre. Les poêles de tôle ou de fonte qui transmettent la chaleur très vite ne la conservent pas comme ceux de terre ou de faïence. Dans les contrées du Nord on a de grands poêles en briques qu'on allume seulement le matin pendant une ou deux heures; cette masse prend ainsi une provision de chaleur qu'elle cède ensuite peu à peu, de manière que l'appartement reste à 15 ou 16° pendant 24 heures, lors même qu'au dehors la température est à 15 ou 20° au-dessous de zéro. Mais il faut pour cela, comme l'observe M. Lamé, que les murs soient formés de substances peu conductrices; le bois convient très bien; des poutres de 8 à 10 pouces d'équarrissage, superposées horizontalement, dont les joints sont remplis avec de l'étoupe et dont l'ensemble est recouvert des deux côtés par des planches de deux pouces d'épaisseur, suffisent pour former une enceinte convenable. Quand les murs sont en briques, on leur donne une épaisseur de 2 ou 3 pieds. Les maisons de pierre ou de marbre sont très rares, et la théorie en indique la raison puisque le marbre conduisant la chaleur deux fois mieux que

la brique, il faudrait donner aux murs une épaisseur de 6 pieds pour produire le même effet.

Imparfaite conductibilité du sol.

1232. Nous avons vu avec quelle lenteur la chaleur du soleil pénétrait dans la terre (868) et nous concevons ce fait maintenant d'après l'imparfaite conductibilité des substances qui composent l'écorce du globe; réciproquement la chaleur intérieure de la terre doit se conserver presque indéfiniment comme l'observation d'ailleurs le démontre (889).

Imparfaite conductibilité de la neige.

1233. Quand la température de l'air descend à plusieurs degrés au-dessous de zéro on trouve constamment que la terre couverte de neige est moins froide que la terre nue, ce qui montre que la neige est une substance peu conductrice qui peut préserver les semences ou les plantes d'un froid trop grand.

Glacières.

1234. La glace se conserve très longtemps dans les glacières, d'abord parce qu'il faut une quantité énorme de chaleur pour fondre un poids considérable de glace et surtout aussi parce que la chaleur du dehors ne peut pénétrer que très difficilement à travers la terre et les pierres épaisses qui forment les parois.

Transport de la glace.

1235. Actuellement on transporte dans l'Inde de la glace prise aux États-Unis; mais pour ne pas tout perdre pendant un trajet de 4 mois au moins, à travers les mers les plus chaudes du globe, il faut isoler la glace en l'entourant de substances peu conductrices. On la taille en blocs réguliers qu'on range de manière à ne pas laisser de vide. La masse remplit une espèce de caisse qui occupe tout le corps du vaisseau, mais qui se trouve séparée de ses murailles par une couche épaisse de tan et de paille. Pour un trajet de 6 mois la perte a été de 55 tonneaux sur 180. On a aussi transporté de la glace de Suède en France, pendant l'été de 1834.

Vêtements.

1236. Les vêtements par eux-mêmes ne donnent aucune chaleur, seulement ils conservent celle qui se développe par l'action de la vie; d'après cela il est évident que, toutes choses égales, ce sont les plus mauvais conducteurs qui fournissent les vêtements les plus chauds; la

laine, la fourrure, les étoffes ouatées, etc., en sont des exemples. Une toile métallique préserverait très mal du froid. Il est à remarquer que les mêmes enveloppes qui empêchent un corps de se refroidir l'empêcheraient aussi de s'échauffer; de sorte que s'il faut vêtir de laine un vase où l'on veut conserver de l'eau longtemps chaude, c'est aussi avec de la laine qu'il faut l'entourer s'il contient de la glace qu'on veuille empêcher de se fondre; sans enveloppe il recevrait du dehors une plus grande quantité de chaleur.

Imparfaite conductibilité du corps des animaux.

1237. La peau, le tissu cellulaire, la graisse conduisent très mal la chaleur; aussi la température de l'intérieur du corps reste-t-elle à 37° environ quand la surface et les extrémités sont à peu près à la température de l'air ambiant. Par suite, il est très difficile d'échauffer le corps artificiellement à une certaine profondeur. Les sachets de sable chaud qu'on applique sur la peau la brûlent quelquefois avant que l'intérieur se réchauffe. Si dans l'état de santé il suffit souvent de se tenir un instant devant le feu pour qu'un sentiment de chaleur se répande dans tout le corps, c'est que le feu agit comme un stimulant; nous nous réchauffons alors non comme des corps inertes, mais par la chaleur que nous développons nous-mêmes en plus grande quantité en vertu de l'excitation reçue.

Conductibilité des liquides.

1238. En général les liquides ne s'échauffent pas comme les solides; il s'y établit des courants (904), ce qui empêche de juger de la conductibilité; mais déjà par cela même qu'une molécule chaude parcourt un long trajet en s'élevant à travers le liquide froid, il est évident que la chaleur ne passe pas facilement d'une molécule à l'autre. D'ailleurs on peut faire en sorte qu'il n'y ait pas de courant, et alors on reconnaît qu'en général les liquides sont de très mauvais conducteurs. Si par exemple on chauffe de l'eau par la partie supérieure en maintenant une plaque de fer rouge à une petite distance, la chaleur se propage vers le fond avec une excessive lenteur. Après avoir rempli un tube à moitié d'eau froide on verse par-des-

Elle est faible.

sus de l'eau très chaude qu'on peut même faire bouillir sans que la partie inférieure s'échauffe sensiblement. Une expérience encore fort remarquable consiste à fixer un morceau de glace au fond d'un vase, à verser par-dessus une couche d'eau froide de 2 ou 3 centimètres, puis une couche d'alcool qu'on enflamme; après la combustion on voit à peine quelques traces de fusion sur les aspérités de la glace.

1239. Quelques physiciens, notamment Rumford, ont nié la conductibilité des liquides, prétendant que le faible échauffement observé à une petite profondeur dans les expériences précédentes venait de la chaleur transmise par les parois des vases; mais voici une expérience qui démontre que les liquides peuvent transmettre la chaleur même sans qu'il y ait de courants. On remplit de mercure une cavité creusée dans un morceau de glace; au fond se trouve un thermomètre dont la tige sort latéralement à travers les parois; on maintient une plaque en fer rouge près de la surface du mercure et on voit le thermomètre monter. Ainsi l'état liquide n'empêche pas la conductibilité; l'expérience précédente montre même que le mercure conduit bien la chaleur; de sorte que si l'eau la conduit mal cela tient à sa nature et non à sa liquidité. Une preuve d'ailleurs que dans l'eau la chaleur passe d'une molécule à l'autre, c'est que quand on mêle exactement de l'eau chaude avec de l'eau froide on obtient toujours la même dilatation pour la même température, quelles que soient les proportions du mélange. Mais non pas nulle.

1240. Par la manière dont s'échauffent les liquides on voit qu'il y a un grand avantage à appliquer la chaleur sur le fond des vases; si on l'appliquait seulement à une certaine hauteur sur les parois latérales, il n'y aurait pas de courants au-dessous de ce point et par conséquent très peu de chaleur transmise; dans certaines blanchisseries on profite des courants qui se forment dans les liquides échauffés pour établir une véritable circulation entre la chaudière et les cuviers à lessive. Les calorifères à eau chaude sont fondés sur le même principe; si par exemple Applications. Chauffage par circulation.

Calorifères à eau chaude. Fig. 339. on échauffe l'eau en A, il y aura un courant continu ascendant par B et descendant par C. C'est par un appareil de ce genre que sont chauffés les couvoirs artificiels de M. Bonnemain.

Conductibilité des gaz. 1241. Les gaz s'échauffent très vite, comme on peut s'en assurer avec le thermomètre de Drebbel ou en présentant devant le feu une vessie presque pleine d'air; la dilatation a lieu presque instantanément. Mais alors, comme dans les liquides, c'est par des courants que la chaleur se transmet, c'est-à-dire que les molécules viennent s'échauffer successivement par leur contact avec les parois; aussi

Elle est très faible. quand on gêne les courants trouve-t-on que les gaz sont de très mauvais conducteurs. Rumford, ayant enfermé un thermomètre dans un ballon plein d'air, vit que la chaleur communiquée au ballon se transmettait au thermomètre bien plus lentement quand on mettait un peu d'édredon pour gêner les courants. Lorsque l'air est refroidi par le bas il n'y a pas de raison pour que les courants s'établissent, aussi trouve-t-on de grandes différences de température à des distances très petites en hauteur (867).

Application. 1242. On voit, d'après cette imparfaite conductibilité, que les couches d'air interposées entre les vêtements sont un des meilleurs moyens de maintenir la chaleur, car les courants ne peuvent pas s'établir aisément dans des espaces aussi étroits. L'utilité des édredons dépend de la même cause; de même dans une fourrure, dans les étoffes ouatées, dans le plumage des oiseaux il faut compter l'air interposé comme faisant partie de l'enveloppe; on a ainsi une couche isolante qui réunit une grande légèreté à une grande épaisseur. D'après les expériences de Rumford, un vase chaud enveloppé d'une fourrure se refroidit plus vite quand le poil est en dedans; cela tient au moins en partie à ce que le tassement expulse une portion de l'air et diminue réellement l'épaisseur. L'imparfaite conductibilité explique encore comment la chaleur se maintient dans les nuages où il n'est guère possible qu'il s'établisse des courants (1126).

§ II. *Rayonnement de la chaleur.*

1243. Si on suspend dans l'air un boulet de fer rouge, on sent tout autour l'impression de la chaleur; on ne peut pas supposer que cet effet soit dû seulement à l'air échauffé, car l'air échauffé monte et on sent très bien la chaleur par-dessous et sur les côtés. D'ailleurs on sait que devant une cheminée il y a un rayonnement très sensible en sens inverse du courant d'air qui vient entretenir la combustion. Ainsi il est bien établi que la chaleur rayonne en tout sens à travers l'air comme la lumière. Nous avons supposé le boulet rouge, mais on a encore des effets très sensibles quand il ne l'est plus, ou même quand on le remplace par un vase rempli d'eau bouillante, de sorte que la propriété de rayonner appartient aussi bien à la chaleur obscure qu'à celle qui est accompagnée de lumière. A cause du froid qu'on observe sur les hautes montagnes, on avait prétendu que les rayons du soleil n'étaient pas chauds par eux-mêmes et qu'ils avaient besoin d'air à un certain degré de densité pour produire leur effet; c'est une erreur; Saussure, en concentrant les rayons avec une lentille, a obtenu sur le Mont-Blanc une chaleur plus intense que celle qu'il avait par le même procédé à Genève, ce qui tient sans doute à la plus grande transparence de l'air. Rayonnement dans l'air.

1244. Puisque la chaleur du soleil nous parvient à travers les espaces célestes, il est évident qu'elle n'a pas, comme le son, besoin d'air pour se propager. Quant à la chaleur obscure, une expérience de Rumford montre qu'elle se propage aussi dans le vide le plus parfait. On fixe un thermomètre au centre d'un ballon de verre en scellant la tige dans une tubulure ; on remplit entièrement de mercure ce ballon qui a un col d'un mètre environ, puis on le redresse, comme un baromètre, dans une cuvette ; le métal s'arrête à une hauteur de $0^m,76$ dans le col, dont on ramollit à la lampe la partie vide, qui s'aplatit et se ferme par la pression atmosphérique ; de Rayonnement dans le vide. Fig. 340.

sorte que le ballon détaché de son col se trouve absolument vide d'air. Or, si on le plonge dans de l'eau chaude on voit aussitôt le thermomètre monter. L'effet est trop prompt pour qu'on puisse l'attribuer à la chaleur transmise par la tige du thermomètre.

La chaleur reçue est en raison inverse du carré de la distance.

1245. En répétant l'expérience précédente avec des ballons de différents diamètres, on trouve que les variations thermométriques ne se font ni plus ni moins vite. Or quand le diamètre est double, la surface rayonnante est quadruple ; et il faut donc que la chaleur provenant de chaque point produise un effet quatre fois moindre sur le thermomètre ; de sorte que si on représente par i la chaleur, qu'un point chaud rayonne sur l'unité de surface à l'unité de distance, $\frac{i}{d^2}$ sera la chaleur reçue à la distance d.

Influence de l'obliquité.

1246. La forme de l'appareil est également sans influence; ainsi au lieu d'un ballon sphérique, on peut prendre un vase cylindrique ou conique, sans que la vitesse d'échauffement soit changée; par conséquent dans les raisonnements relatifs à la chaleur rayonnante, on pourra toujours remplacer une enceinte irrégulière par une surface sphérique, également chaude et d'un rayon quelconque. Ce que nous disons de la totalité est évidemment vrai de chacune des parties, c'est-à-dire que le rayonnement d'un élément de surface est égal au rayonnement de sa projection, de sorte que par exemple le soleil qui nous présente un hémisphère, ne nous envoie pas plus de chaleur que s'il était réellement plat comme il paraît l'être; c'est l'obliquité des différentes parties qui établit la compensation.

Rayonnement des corps froids.

1247. Le même appareil sert à démontrer que les corps que nous appelons froids rayonnent encore. Plongeons le ballon dans un mélange réfrigérant, nous verrons le thermomètre baisser rapidement ; son refroidissement est évidemment dû à ce qu'il perd de la chaleur par le rayonnement et que les parois actuellement refroidies ne lui en envoient plus assez pour compenser ses pertes.

1248. Les variations d'un thermomètre placé ainsi dans une enceinte vide sont soumises à une loi très remarquable ; supposons qu'il y ait d'abord une différence de 15° entre la température de l'instrument et celle de l'enceinte, et qu'on ait observé dans la première minute un abaissement de 2° ; on ne trouvera plus qu'une variation de 1° quand la différence de température sera réduite à moitié ; et en général on verra que *la variation pendant un instant très court est proportionnelle à la différence de température au commencement de cet instant.* C'est en cela que consiste la loi de Newton ou plutôt de Richmann. Elle s'applique au cas de l'échauffement comme à celui du refroidissement; mais elle cesse d'être exacte quand les différences de température surpassent 30 ou 40°. Dans l'air elle est encore sensiblement vraie tant qu'il ne s'agit que de températures peu élevées. On peut s'en assurer en notant minute par minute l'abaissement d'un thermomètre préalablement échauffé et suspendu dans un espace où la température ne varie pas sensiblement. Ce que nous disons d'un thermomètre s'applique évidemment à un point matériel quelconque, et même à un corps entier, pourvu que tous ses points soient au même instant à la même température; c'est par exemple le cas d'une masse liquide où les courants rétablissent continuellement l'uniformité.

Loi de Newton.

Cas où elle s'applique.

1249. Dans les limites où la loi de Newton est vraie les diverses substances ont en général une chaleur spécifique constante, c'est-à-dire qu'il leur faut la même quantité de chaleur pour varier de 1°, qu'elles soient à 0, à 10 ou à 20°, bien entendu que cette chaleur varie d'une substance à l'autre. D'après cela il est évident que la chaleur gagnée ou perdue est proportionnelle à la variation thermométrique, et que la loi de Newton revient à dire que *la chaleur gagnée ou perdue à chaque instant est proportionnelle à la différence de température.* Il est important de noter que cet énoncé suppose la température comptée sur le thermomètre à mercure, car l'uniformité de la chaleur spécifique ne s'observerait plus par exemple pour le thermomètre à alcool.

Autre énoncé de la loi.

Mesure de la chaleur rayonnante.

1250. La loi de Newton fournit un très bon moyen de mesurer la chaleur rayonnante. Supposons que dans une enceinte dont la température reste fixe on expose un thermomètre au rayonnement d'une source quelconque de chaleur, et qu'on observe une élévation de 4° *quand l'instrument est stationnaire.* Il est clair qu'alors la chaleur reçue est égale à la chaleur perdue; mais celle-ci, d'après la loi, est proportionnelle à l'excès de température; donc la chaleur reçue pourra être représentée par cet excès, c'est-à-dire par le nombre 4; de sorte que si, à une autre distance de la source, on n'obtient plus qu'une élévation de 1° *quand l'instrument est redevenu stationnaire*, on pourra conclure que la chaleur reçue dans ce dernier cas n'est que le quart de ce qu'on recevait dans le premier. On constate ainsi très bien que, dans l'air comme dans le vide (1248), la chaleur reçue est en raison inverse du carré de la distance. On peut aussi, en plaçant le thermomètre successivement à la même distance de deux sources différentes, une bougie par exemple et une lampe, comparer leur intensité, c'est-à-dire leur rayonnement calorifique. Il faut nécessairement se servir d'*un même thermomètre* dans chaque comparaison, car la loi de Newton, sur laquelle on se fonde, suppose que l'instrument placé dans les mêmes circonstances perdrait ou recevrait toujours la même quantité de chaleur.

Thermomètre différentiel de Leslie. Fig. 341.

1251. On doit à Leslie un thermomètre qui donne immédiatement les différences de température sans qu'on ait besoin de s'inquiéter de la température de l'enceinte. L'instrument se compose d'un tube recourbé terminé par deux boules pleines d'air; le tube contient un liquide coloré qui sert d'index. Pour faire la graduation on écrit d'abord 0 vis-à-vis l'index quand les boules sont à la même température; ensuite on établit entre elles une différence de 10° en plongeant l'une dans l'eau à 10°, tandis que l'autre est dans de la glace fondante. On marque de même les différences de 20 ou de 30°, puis, par approximation, on divise les intervalles en parties égales. Pour se servir de cet instrument, on expose l'une des boules à la chaleur rayon-

nante qu'on veut mesurer, en ayant soin de préserver l'autre avec un écran.

1252. On possède aujourd'hui un thermomètre différentiel bien préférable à celui de Leslie; mais comme il est fondé sur l'électricité, nous ne le décrirons qu'en traitant cette partie de la physique. Il est vrai que plusieurs des expériences dont nous allons parler ne se réalisent qu'avec cet instrument; mais on peut toujours les concevoir en imaginant un thermomètre différentiel d'une excessive sensibilité. Pour donner une idée de celle du *thermo multiplicateur*, nous dirons qu'il est affecté par la chaleur de la main placée à 25 ou 30 pieds, et que l'effet est instantané.

— de Nobili ou thermomètre multiplicateur.

1253. Leslie a découvert que des surfaces égales, mais de nature différente, n'émettaient pas la même quantité de chaleur, bien qu'elles fussent à la même température. Prenons un vase cubique rempli d'eau bouillante, ayant une face couverte de noir de fumée, et une autre argentée et bien polie; si nous les tournons successivement vers un thermomètre, nous verrons que la face métallique émet beaucoup moins de chaleur que la face noircie. Si par exemple, avec le noir de fumée, on soutient le thermomètre différentiel à 10°, avec la face argentée on n'obtiendra que 0°,12. Bien entendu que l'eau est entretenue bouillante, ou du moins à la même température. On peut se servir pour cela d'une lampe à esprit-de-vin, en ayant soin d'interposer un écran entre elle et le thermomètre. Nous savons que les nombres obtenus quand l'instrument est stationnaire donnent la mesure de la chaleur reçue, qui est évidemment proportionnelle à la chaleur émise (1250).

Pouvoir rayonnant.

Fig. 334.

Procédé pour le mesurer.

On conçoit donc qu'en appliquant différentes substances sur les faces du cube, on ait pu construire la table suivante où l'on a représenté par 100 le pouvoir rayonnant de la substance qui rayonne le plus.

Table des pouvoirs rayonnants.

Noir de fumée	100
Carbonate de plomb	100
Papier	98

Colle de poisson.	91
Verre.	85
Encre de Chine.	85
Gomme-laque	72.
Surface métallique suivant le poli.	12 à 15

Influence du poli.

1254. On voit que les métaux perdent par le rayonnement beaucoup moins de chaleur que les autres substances, surtout quand ils sont bien polis; en les rayant, on augmente sensiblement leur pouvoir émissif, et il est évident que cet effet ne peut pas être attribué à l'accroissement de surface (1246). Cependant tout ne dépend pas du poli, puisque le verre a un très grand pouvoir rayonnant. La transparence n'a aussi qu'une influence secondaire, puisque des substances opaques rayonnent autant ou plus que le verre. Il en est de même de la couleur; car le carbonate de plomb, qui est d'une blancheur parfaite, émet autant de chaleur que le noir de fumée. Un fait bien remarquable, c'est qu'une couche très mince de noir de fumée suffit pour porter à 100 le pouvoir rayonnant d'une surface quelconque, même métallique; de sorte que le rayonnement ne provient réellement que d'une couche très superficielle; cependant, pour certaines substances du moins, il dépend de l'épaisseur. Si on applique une couche très mince de colle à bouche ou de vernis à la gomme-laque sur une surface métallique, on augmente son pouvoir rayonnant; mais il faut un certain nombre de couches pour obtenir le maximum d'effet. Les rapports indiqués dans le tableau ont été déterminés pour des températures qui ne dépassent pas 100°; pour les températures plus élevées, il y a en général des variations. Cependant il résulte des expériences de M. Dulong que le noir de fumée et les métaux conservent le même rapport dans leurs pouvoirs rayonnants au moins jusqu'à 3 ou 400 degrés.

Influence de la transparence.

Influence de la couleur.

Influence de l'épaisseur.

Influence de la température.

Faible rayonnement des gaz.

1255. Le rayonnement des gaz est beaucoup plus faible que celui des solides et des liquides; si l'on cache la flamme d'une lampe à alcool par un écran, pour ne laisser à découvert que le large courant de gaz très chaud qui

s'élève au-dessus d'elle, le thermomètre le plus sensible, placé à une petite distance, donnera à peine quelques signes d'échauffement. La flamme qui n'est qu'un gaz incandescent rayonne, il est vrai, d'une manière assez marquée, mais aussi sa température est excessive ; et encore son rayonnement est-il beaucoup plus faible que celui d'un corps solide présentant bien moins de surface, comme on peut s'en assurer en faisant rougir dans la flamme une spirale de fil de platine; l'effet thermométrique devient alors trois ou quatre fois plus grand.

Réflexion de la chaleur. Fig. 344.

1256. Les rayons de chaleur se réfléchissent comme les rayons de lumière ; cela se démontre ordinairement au moyen de deux miroirs sphériques concaves, qu'on oppose l'un à l'autre à 6 ou 7 mètres de distance. Si on place une bougie sur l'axe commun en un certain point F qu'on trouve sans peine par tâtonnement, on voit se former en F′ à la même distance au-devant de l'autre miroir, une image renversée de la flamme, assez chaude pour produire un effet très sensible sur un thermomètre qu'on y plonge; un peu en dehors l'effet est nul. On démontre en optique que les rayons de lumière partis du point F se réfléchissent sur le premier miroir de manière à devenir parallèles à l'axe, et que le second miroir les fait converger en F′. Or, dans ces deux réflexions la chaleur accompagne la lumière puisqu'elle se concentre en F′ ; on peut donc dire qu'elle se réfléchit comme elle. Si on met au foyer F quelques charbons ardents, on pourra enflammer de la poudre ou de l'amadou au foyer conjugué F′. On aurait des effets semblables, mais moins marqués avec la chaleur obscure. Par exemple, dans une expérience de Pictet, un boulet de fer de 2 pouces refroidi jusqu'à l'obscurité a fait monter le thermomètre focal à 14°, 5 en 6′. La chambre était à 4° ; les deux miroirs à 12 pieds. Un autre thermomètre placé à la même distance du boulet et de l'observateur n'était monté qu'à 6°. On voit que l'effet dû à la chaleur réfléchie était de 8,5. Avec un matras d'eau bouillante, on obtient une élévation de plus de 1°. Ces expériences ne réussissent bien qu'avec des miroirs métalliques.

Réflexion apparente du froid.

1257. En remplaçant le corps chaud par de la glace ou par un mélange réfrigérant, on reconnaît qu'un thermomètre baisse en F′ plus que partout ailleurs, à moins que ce ne soit très près de F. Pour concevoir ce phénomène supposons que la glace ne soit pas encore placée et que l'équilibre de température existe dans l'enceinte. Le thermomètre qui est en F′ reçoit après deux réflexions tous les rayons qui, provenant des parois de l'enceinte, passent par le point F ; ces rayons sont nécessaires à sa température qui doit baisser quand on les arrête en mettant la glace en F. Si le thermomètre n'était pas en F′ sa température dépendrait moins des rayons réfléchis; sa perte serait donc moindre par l'interposition de la glace. Quand on se sert de miroirs dépolis, le thermomètre en F′ baisse à peine, parce que sa température alors dépend très peu de la réflexion.

Remarque.

Il ne faudrait pas s'imaginer qu'il suffirait de dépolir les miroirs pour produire du froid, car par cela seul qu'on diminue la réflexion on augmente le rayonnement, et l'expérience prouve qu'il y a compensation parfaite.

Pouvoir réfléchissant. Fig. 345.

1258. Pour mesurer le pouvoir réfléchissant des diverses substances on en prépare des lames bien polies qu'on établit successivement sur un support S; en V, à une certaine distance, et un peu plus haut, on place un vase rempli d'eau bouillante; puis en P, sur la route du rayon réfléchi un thermo-multiplicateur, préservé du rayonnement direct par un écran F. On trouve ainsi que l'eau, les différents liquides, la faïence, les émaux, le marbre, le verre, etc., réfléchissent beaucoup moins de chaleur que les métaux; le noir de fumée n'en réfléchit pas sensiblement, et en général, pour avoir l'ordre des pouvoirs réfléchissants on n'a qu'à prendre l'ordre inverse des pouvoirs rayonnants (1253).

Influence de l'obliquité.

1259. On constate aisément, en faisant tomber la chaleur plus ou moins obliquement sur une même substance, que l'intensité des rayons réfléchis augmente avec l'obliquité, de sorte que c'est près de l'incidence perpendiculaire que la réflexion est la plus faible. Cependant,

M. Melloni a trouvé que la proportion de lumière réfléchie restait sensiblement la même tant que l'angle d'incidence, compté de la normale, ne dépassait pas 25 ou 30°.

1260. Dans ces limites la chaleur réfléchie forme à très peu près un quatre-centième de la chaleur incidente sur la première surface de toutes les substances que la chaleur peut traverser; quant aux autres la proportion est plus forte; pour le cuivre jaune, par exemple, elle s'élève à plus de 0,44; et elle est à très peu près de même pour tous les métaux bien polis. Les résultats que nous venons d'indiquer se vérifient non-seulement pour la chaleur de l'eau bouillante, mais pour celle provenant de toute autre source, de sorte que le pouvoir réfléchissant ne présente pas les variations que nous allons trouver dans les pouvoirs transmissif et absorbant.

Rapport entre la chaleur incidente et la chaleur réfléchie.

1261. Les substances transparentes se laissent en général traverser instantanément par la chaleur comme par la lumière. Cela est évident pour la chaleur du soleil, qui passe comme on sait très bien à travers les vitres et qu'on peut concentrer comme la lumière avec les lentilles ou verres brûlants. Mais cela est encore facile à vérifier pour la chaleur artificielle, même quand elle est complétement obscure. Qu'on mette sur une même ligne une lampe ou un vase rempli de mercure bouillant, un écran opaque, une lame de verre et un thermo-multiplicateur. On verra ce dernier instrument marcher à l'instant même où on enlèvera l'écran. L'effet sera si prompt qu'on ne pourra pas l'attribuer à l'échauffement de la lame de verre; d'ailleurs en la couvrant d'une couche d'encre de Chine tout est arrêté, et cependant un pareil enduit, si la lame s'échauffait, ne ferait qu'augmenter son rayonnement vers le thermomètre. M. Melloni s'est ainsi assuré que la chaleur rayonnante traversait instantanément des morceaux de cristal de roche de 5 à 6 pouces d'épaisseur.

Transmission de la chaleur rayonnante.

1262. L'appareil de M. Melloni pour les expériences sur la transmission de la chaleur rayonnante se compose 1° du thermo-multiplicateur P; 2° d'un support S sur lequel on pose la substance que la chaleur doit traverser;

Appareil pour les expériences.

Fig. 342.

3° d'une source de chaleur variable ; ici c'est une lampe L à alcool et à spirale de platine T ; 4° d'un écran E′ percé d'un trou O ; cet écran ne laisse passer qu'un faisceau déterminé de rayons. L'écran E′ s'enlève au moment où l'on fait l'expérience. Quant à l'écran E on l'emploie pour que tout soit pareil vis-à-vis les deux faces du thermo-multiplicateur; et même M. Melloni enferme maintenant l'instrument dans une enceinte en fer-blanc, parfaitement close, afin que la température soit plus uniforme. Il y a seulement une ouverture qu'on gradue à volonté par des diaphragmes. L'écran E devient alors inutile. La coulisse RR′ permet d'établir les écrans et les supports aux distances convenables.

Diathermanéité.

1263. On appelle *diathermanes* les substances qui transmettent la chaleur rayonnante, de même qu'on appelle *diaphanes* celles qui transmettent la lumière. Il est à remarquer que les substances les plus diaphanes ne sont pas toujours les plus diathermanes ; l'eau la plus limpide laisse passer moins de chaleur que l'huile ; un morceau d'alun aussi transparent que du cristal est moins diathermane qu'une lame de tourmaline, malgré sa teinte verte foncée. Il existe du cristal de roche qui a naturellement une teinte brune et qu'on appelle *enfumé* pour cette raison. M. Melloni a reconnu qu'un morceau de ce cristal ayant 100 millimètres d'épaisseur transmettait encore plus de la moitié de la chaleur d'une lampe d'Argant, tandis qu'une lame d'alun d'une transparence parfaite d'un millimètre d'épaisseur seulement, n'en laissait passer que les dix-sept centièmes. Enfin il est des substances entièrement opaques qui sont cependant diathermanes ; tel est le verre noir ; à égalité d'épaisseur il laisse même passer plus de chaleur que l'alun le plus limpide. Parmi les corps solides on ne peut citer que le *sel gemme* qui approche de la diathermanéité parfaite ; l'alun, l'eau et les substances opaques en général sont au contraire, très peu diathermanes.

Séparation de la chaleur

1264. Avec des substances transparentes *athermanes*, M. Melloni est parvenu à priver complétement la lumière

du soleil de sa chaleur. Cette lumière, il est vrai, était un peu affaiblie par l'imperfection de la transparence, mais en la concentrant par des lentilles, on pouvait l'obtenir aussi vive qu'on le voulait sans qu'il se manifestât de chaleur appréciable. Des expériences sur la lumière artificielle ont donné le même résultat. Ainsi lors même que les rayons de chaleur et de lumière se trouvent réunis, on ne doit pas les confondre. La nature d'ailleurs nous les présente souvent séparés. La lumière de la lune est sans chaleur sensible ; concentrée par les plus fortes lentilles, elle ne fait pas monter le thermomètre d'un centième de degré. D'un autre côté les corps donnent de la chaleur sans lumière tant que leur température ne dépasse pas 4 ou 500°. Nous reviendrons en optique sur cette distinction des rayons de chaleur et des rayons de lumière, et nous verrons encore d'autres moyens de les séparer.

et de la lumière.

1265. Les rayons de chaleur peuvent différer non-seulement par l'intensité, mais par beaucoup d'autres qualités, ainsi que nous le ferons voir en optique. Ici nous signalerons seulement la *diathermansie*, qualité en vertu de laquelle certains rayons passent plus facilement que d'autres à travers un milieu donné. Qu'on expose successivement une même lame de verre à des rayons d'égale intensité provenant de sources différentes, on aura des faisceaux transmis d'intensité très diverse. L'inégale diathermansie doit être admise aussi dans les rayons provenant d'une même source ; car puisque le verre laisse passer certains rayons plutôt que d'autres, il est naturel d'attribuer au moins en partie l'affaiblissement de chaque faisceau dans l'expérience précédente, à ce qu'il est composé de rayons doués d'une diathermansie inégale. Cette manière de voir se trouve d'ailleurs confirmée par tous les faits connus.

Hétérogénéité de la chaleur. Diathermansie.

1266. Nous avons pris le verre pour exemple, mais on trouverait de même que les autres substances diathermanes laissent passer certains rayons de préférence. En général les rayons qui passent plus facilement que d'autres à travers une substance, passent aussi plus facilement à travers une autre ; mais il y a des exceptions, de sorte qu'il faut ad-

Pouvoir diathermique.

mettre dans chaque milieu diathermane un pouvoir *diathermique* propre. On peut juger du pouvoir diathermique ou transmissif des différentes substances en les exposant successivement au rayonnement d'une même source et en mesurant la chaleur transmise. Mais comme celle-ci dépend non-seulement du pouvoir diathermique des milieux, mais aussi de la diathermansie des rayons, on doit s'attendre à trouver des proportions différentes et même un ordre différent si on opère avec différentes sources ou sur de la chaleur ayant déjà traversé certains milieux; on trouverait par exemple que le verre et le cristal de roche, en lames de 7 à 8 millimètres, transmettent sans perte la chaleur qui a traversé une couche d'eau de 1 à 2 millimètres, ou une lame d'alun de même épaisseur, tandis qu'il y a une perte énorme dans la plupart des autres cas.

Expériences sur le pouvoir diathermique et la diathermansie.

1267. Pour donner une idée du pouvoir diathermique des divers milieux et de la diathermansie des rayons provenant de différentes sources, nous rapporterons les résultats d'une belle série d'expériences faites par M. Melloni. Les sources de chaleur sur lesquelles il a opéré étaient : 1° une lampe de Locatelli, c'est une petite lampe sans verre, à simple courant d'air; 2° une spirale de fil de platine maintenue à l'état d'incandescence au-dessus d'une lampe à esprit-de-vin ; 3° une lampe à alcool couverte par une lame de cuivre noirci qui prenait une température fixe de 390°, comme on s'en est assuré par la méthode des mélanges (1143); 4° un vase en cuivre mince noirci à l'extérieur et rempli d'eau maintenue en ébullition. Des écrans convenablement disposés permettaient d'opérer sur un faisceau de rayons bien déterminé. Les quatre sources étaient d'ailleurs placées successivement à des distances convenables pour produire toutes le même effet sur le thermo-multiplicateur avant l'interposition de la substance à essayer.

1268. *Pouvoir diathermique des solides.*

NOMS des substances interposées. (*Épaisseur commune* $2^{mm},6$).	TRANSMISSION sur une quantité de chaleur représentée par 100 et provenant			
	de la lampe de Locatelli.	du platine incandescent.	du cuivre noirci chauffé à 390°.	du cuivre noirci chauffé à 100°.
Sel gemme (incolore).	92	92	92	92
Chaux fluatée (incolore).	78	69	42	33
Sel gemme (louche).	65	65	65	65
Chaux fluatée (verdâtre).	46	38	24	20
Spath d'Islande (incolore).	39	28	6	0
Verre de glace (incolore).	39	24	6	0
Cristal de roche (incolore). . . .	38	28	6	0
Cristal de roche enfumé.	37	28	6	0
Bichromate de potasse (orangé). .	34	28	15	0
Carbonate de plomb (incolore). .	32	23	4	0
Agate blanche (translucide). . . .	23	11	2	0
Ambre artificiel (jaune).	21	5	0	0
Tourmaline verte (vert foncé). . .	18	16	3	0
Corne de bœuf (translucide). . . .	18	4	0	0
Gomme commune (jaunâtre). . .	18	3	0	0
Chaux sulfatée (incolore).	14	5	0	0
Ambre naturel.	11	5	0	0
Alun (diaphane, incolore).	9	2	0	0
Sucre candi (incolore).	8	0	0	0
Glace très pure.	6	0	0	0

1269. On voit que le verre qui transmet plus du tiers de la chaleur d'une lampe ne livre passage qu'au quart de celle qui provient de platine incandescent ; la proportion est encore moindre quand la source est obscure ; plusieurs substances diathermanes deviennent alors sensiblement athermanes ; c'est ce qui a lieu pour le sulfate de chaux doué cependant de la transparence la plus parfaite. Enfin la transmission est à peu près nulle pour presque tous les corps quand il s'agit de la chaleur de l'eau bouillante. En général Remarques.

la perte est d'autant moindre que la température de la source est plus élevée. Quand il y a incandescence, c'est-à-dire quand les rayons de lumière accompagnent les rayons de chaleur, ceux-ci jouissent d'une grande diathermansie, qu'on peut en quelque sorte mesurer par la vivacité de la lumière. Aussi les rayons du soleil traversent-ils les substances les moins diathermanes; avec la glace elle-même on fait de véritables verres brûlants.

Le sel gemme est tout-à-fait hors ligne parmi les substances diathermanes; il transmet toujours la même proportion de chaleur; avec une flamme brillante ou simplement avec de l'eau à 40 ou 50°, une lame de 2mm,62 d'épaisseur transmet toujours les 92 centièmes de la chaleur incidente.

M. Melloni a constaté que les verres colorés n'ont pas sur la chaleur rayonnante d'action qui paraisse dépendre de la couleur; il a remarqué seulement la très faible diathermansie du verre noir et du verre coloré par de l'oxide de cuivre en vert bleuâtre. C'est avec ce dernier verre et une certaine épaisseur d'eau qu'il a arrêté complétement la chaleur des rayons solaires.

Pouvoir diathermique des liquides.

1270. Pour mesurer le pouvoir transmissif des liquides M. Melloni s'est servi d'une auge de verre ayant en dedans 9mm 2 de largeur; la source était une lampe d'Argant, munie de sa cheminée de verre. En représentant par 100 la chaleur transmise, quand l'auge était vide, on a eu avec

Le carbure de soufre.	63
L'huile d'olive.	30
L'éther sulfurique.	21
L'acide sulfurique	17
L'alcool	15
L'eau.	11

On voit que l'eau, soit à l'état solide, soit à l'état liquide, transmet très mal la chaleur rayonnante.

Pouvoir diathermique des gaz.

1271. Quant aux gaz, on n'a pas encore d'expériences comparatives, mais on sait que l'air transmet très bien la

chaleur, puisque tous les phénomènes de la chaleur rayonnante ont lieu dans ce fluide.

1272. On conçoit sans peine que la chaleur transmise diminue à mesure que l'épaisseur augmente, mais un fait bien remarquable observé d'abord par Delaroche et vérifié depuis par M. Melloni, c'est que la perte due à l'épaisseur va toujours en diminuant ; si la chaleur rayonnante a été réduite à moitié en traversant une certaine épaisseur, ce qui reste n'éprouve pas à beaucoup près une perte de moitié en traversant une épaisseur pareille. C'est une conséquence évidente de l'hétérogénéité de la chaleur et de ce que les substances diathermanes font un véritable triage parmi les rayons. Ceux qui ont pu traverser une certaine épaisseur jouissent évidemmeut d'une plus grande diathermansie que les autres ; il n'est donc pas étonnant qu'ils éprouvent proportionnellement moins de perte dans les traversées ultérieures. Influence de l'épaisseur sur la transmission.

1273. La chaleur qui vient frapper un corps se divise en général en trois parties, une qui se réfléchit, une qui est transmise, et une troisième qui est absorbée comme le prouve l'imperfection de la diathermanéité. C'est parce qu'elle est ainsi absorbée que la chaleur rayonnante produit l'échauffement, qui n'est évidemment dû ni à la chaleur réfléchie ni à la chaleur transmise. Absorption de la chaleur rayonnante.

1274. On n'a bien mesuré jusqu'à présent le pouvoir absorbant que pour les substances athermanes ; tels sont les métaux, le noir de fumée, etc. Par des expériences très précises M. Dulong a reconnu que pour ces substances le pouvoir absorbant était égal au pouvoir rayonnant (1253). M. Melloni est parvenu à la même loi par un procédé moins rigoureux, mais sensiblement exact, comme le prouve l'accord même des résultats. Il se sert d'un écran métallique très mince, dont une face tournée vers la source de chaleur est recouverte de la substance qu'on veut essayer, tandis que l'autre, enduite de noir de fumée, pour qu'elle ait un grand pouvoir rayonnant, regarde le thermomètre placé à une petite distance. *En admettant que le rayonnement de cette face est proportionnel à la chaleur absorbée* Pouvoir absorbant. Il est égal au pouvoir rayonnant.

par l'autre et en opérant avec la chaleur de l'eau bouillante, on retombe précisément sur les nombres qui représentent les pouvoirs rayonnants déterminés à la même température.

Influence de la source de la chaleur.

1275. Comme les substances essayées sont sensiblement athermanes pour la chaleur de l'eau bouillante, l'écran métallique ne s'échauffe que par la chaleur absorbée et nullement par la chaleur transmise jusqu'au noir de fumée; il n'en est plus de même quand on opère avec une source d'une température très élevée, le phénomène alors devient complexe et l'on observe des variations analogues à celles que nous avons constatées dans les pouvoirs transmissifs, en employant la chaleur de différentes sources. Quoi qu'il en soit, voici les résultats obtenus dans ce cas par M. Melloni :

	Platine incandescent.	*Cuivre* à 400°.	*Cuivre* à 100°.
Noir de fumée.	100	100	100
Carbonate de plomb. .	56	89	100
Colle de poisson. . .	54	64	91
Encre de Chine. . . .	95	87	85
Gomme laque.	47	70	72
Surface métallique. .	13,5	13	13

On voit que la température de la source n'a pas d'influence sensible sur les pouvoirs absorbants des métaux.

Pouvoir absorbant des couleurs.

1276. Les diverses couleurs n'ont pas d'action particulière sur la chaleur obscure, mais elles absorbent très inégalement la chaleur solaire ; ainsi un morceau de drap noir, mis au soleil sur la neige, en fait fondre bien plus qu'un morceau de drap blanc ; on peut conclure de là que les vêtements blancs sont préférables en été et les noirs en hiver; s'il n'y a de différence que dans la couleur, leur pouvoir rayonnant est le même puisque la chaleur du corps est bien au-dessous de 100° (1254).

Réfraction, dispersion, polarisation de la chaleur.

1277. Nous venons de voir que la chaleur se réfléchissait sur les corps et les traversait instantanément comme la lumière; l'expérience si connue des verres ardents,

qu'on peut répéter sur la chaleur obscure avec une lentille de sel gemme, établit le fait de la *réfraction*; la *dispersion*, la *polarisation*, ont aussi été constatées, mais nous n'examinerons ces modifications dans la chaleur qu'après les avoir étudiées dans la lumière.

CHAPITRE IX.

ÉCHAUFFEMENT ET REFROIDISSEMENT.

---

§ I. *Marche générale de l'échauffement et du refroidissement.*

Marche du refroidissement en général.

1278. Le refroidissement d'un corps se fait en général à la fois par le contact de l'air et par le rayonnement, dont les effets varient suivant mille circonstances, de sorte que le phénomène est extrêmement compliqué. Cependant nous avons déjà une idée de sa marche par des expériences journalières; ainsi nous savons qu'un corps fortement chauffé perd d'abord en très peu de temps une très grande quantité de chaleur; que son refroidissement se fait ensuite d'une manière bien plus lente, de sorte que si dans la première minute sa température a baissé de 40°, par exemple, il arrive un moment où elle ne baisse pas même d'un degré par minute. Les pertes diminuant ainsi continuellement, le corps finit par ne plus donner qu'une quantité de chaleur précisément égale à celle qu'il reçoit des corps environnants; alors sa température est stationnaire en vertu d'une espèce d'équilibre qu'on peut appeler mobile, car il est évident que le rayonnement continue de part et d'autre.

Vitesse décroissante.

Température stationnaire.

Mêmes phénomènes pour l'échauffement.

1279. De ce fait que la perte de chaleur est plus grande quand l'excès de température est plus grand, on conclut qu'un corps soumis à l'action d'une source constante de

chaleur ne peut pas s'échauffer indéfiniment, et qu'il doit arriver un moment où la chaleur perdue est égale à la chaleur reçue. En effet, on sait qu'un corps froid transporté dans un lieu, à 20° par exemple, ne peut pas s'échauffer à plus de 20°, et qu'un thermomètre placé au soleil n'acquiert qu'un excès déterminé de température. On conçoit très bien aussi que l'échauffement doive devenir de plus en plus lent à mesure qu'on approche de la température limite.

Variations de température pendant un temps donné.

1280. Avec la loi de Newton (1248) on calcule aisément à quoi se réduit au bout d'un temps donné la différence entre la température du thermomètre et du lieu où il est placé. En effet, d'après la loi, l'instrument perd à chaque instant une fraction constante de sa différence de température au commencement de cet instant ; d'où il suit que les différences décroissent en progression géométrique. Ainsi dans l'exemple du n° cité la différence qui était d'abord 15°, devient $15 - 15 \frac{2}{15}$, ou $15 \left(\frac{13}{15}\right)$, à la fin de la première minute ; $15 \left(\frac{13}{15}\right)^2$ à la fin de la 2e, $15 \left(\frac{13}{15}\right)^3$ à la fin de la 3e, etc. ; de sorte que si on représente par a la différence initiale, par θ la différence après n minutes écoulées, et par q la raison de la progression, on a

Formule générale.

$$\theta = a\, q^n$$

Par exemple, au bout d'une demi-heure, la différence est réduite à $\frac{1}{4}$ de degré environ ; on voit qu'elle ne devient mathématiquement nulle qu'au bout d'un temps infini ; mais bientôt elle cesse d'être appréciable.

Un corps met le même temps à s'échauffer qu'à se refroidir.

1281. On peut répéter le même raisonnement pour le cas où la température du thermomètre est au-dessous de celle de l'enceinte ; et on retombe sur la même formule. Il s'ensuit que l'instrument met précisément le même temps à se réchauffer qu'à se refroidir d'un même nombre de degrés. Si par exemple on le met à 6° dans une enceinte à 21°, au bout d'une demi-heure il marquera 20° $\frac{3}{4}$; si au contraire on l'avait mis dans un espace à 9° au-dessous de zéro, ce qui eût toujours donné la même différence absolue de 15°, sa température, au bout d'une demi-heure, eût été de — 8° $\frac{3}{4}$. Les expériences de ce genre réussis-

sent encore mieux dans le vide, où nous savons que la loi de Newton est plus exacte. Elles fournissent alors la meilleure preuve de l'égalité du pouvoir absorbant et du pouvoir rayonnant.

1282. Il est évident que les nombres que nous venons d'indiquer ici se rapportent qu'au thermomètre pris pour exemple; pour un autre on aurait, en général, une autre raison dans la progression. Il est important d'observer qu'en prenant, outre la différence initiale a, une différence θ, après un certain nombre de minutes, on peut calculer q, par la formule même, qui se trouve alors plus exacte que si on avait pris la différence après une minute seulement. **Remarques.**

1283. On peut encore, à l'aide de la loi de Newton, calculer la température à laquelle doit s'arrêter un thermomètre exposé au soleil ou en général à une cause quelconque d'échauffement ou de refroidissement qui ne varie pas d'une manière brusque. Supposons que le thermomètre soit monté en $2'$ de $3°$ et de $5°$ en $4'$. La différence initiale a entre la température finale et celle qu'avait d'abord le thermomètre, est inconnue, mais on sait qu'aux époques $2'$ et $4'$, depuis le commencement de l'observation, la différence variable θ était $a - 3$ et $a - 5$, de sorte qu'on a les deux équations, **Calcul de la limite.**

$$a - 3 = aq^2,\ a - 5 = aq^4 \text{ d'où } a = 9$$

C'est-à-dire que si le thermomètre était d'abord à 10° il s'arrêtera à 19°.

1284. Pour savoir combien il mettra de temps à atteindre la température limite, supposons qu'il ne puisse pas donner les dixièmes de degré; il nous paraîtra stationnaire dès que la différence θ ne sera plus que d'un dixième; or les opérations précédentes donnent $q = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}}$, de sorte qu'on a par la formule générale, **Temps nécessaire pour l'atteindre.**

$$0{,}1 = 9\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{n}{2}} \text{ d'où } n = 21'$$

Chaleur perdue ou gagnée dans un temps donné.

1285. D'après les chaleurs spécifiques et les poids du mercure et du verre qui composent un thermomètre, on calcule aisément la chaleur nécessaire pour faire varier sa température de 1°; mais pour simplifier le raisonnement, nous supposerons qu'il faille pour cela précisément une unité de chaleur; alors la perte pendant un intervalle de temps déterminé sera représentée par la variation même de température, qu'on connaîtra par l'observation ou par le calcul. Ainsi dans l'exemple que nous avons pris on trouve qu'à la fin de la première seconde la différence

$$\theta = 15\left(\frac{13}{15}\right)^{\frac{1}{60}} = 14°,9673$$

D'où il suit que la perte est de 0,0357 d'unité de chaleur.

Cas où la température est stationnaire.

1286. Quand la température est stationnaire on obtient très approximativement la perte pendant un temps donné en la calculant pour 1″ comme si le thermomètre baissait réellement, et en multipliant le résultat par le nombre de secondes écoulées. Ici, par exemple, on obtient 21,42, pour le cas où le thermomètre est resté stationnaire à 15° pendant 10 minutes. Un calcul plus élevé montre que, d'après la loi de Newton, si on désigne par v la perte pendant l'unité de temps lorsque la température est stationnaire, on a

$$v = 2,303\,\theta \log. q = 2,303 \times 15 \log. \tfrac{13}{15} = 2,1424.$$

Et par conséquent 21,424 unités de chaleur pour 10′.

Nous avons pris un thermomètre pour exemple, mais on raisonnerait de même sur tout autre corps auquel la loi de Newton serait applicable; par exemple, si une masse liquide m, où les courants rétablissent continuellement l'uniformité de température, a été maintenue pendant un temps t avec un excès constant θ sur l'air environnant, la

chaleur reçue, qui dans ce cas est nécessairement égale à la chaleur perdue, sera

$$2,303\, \theta\, m\, t \log q.$$

q, qui est la raison relative à l'unité de temps que l'on adopte, se détermine par les variations de température observées avant ou après l'état stationnaire.

§ II. *Influence de la chaleur spécifique et de la chaleur latente.*

Cette influence est surtout remarquable pour l'eau.

1287. Il est évident que les corps doués d'une grande chaleur spécifique doivent mettre plus de temps que les autres à se refroidir et à s'échauffer. L'eau sous ce rapport est particulièrement remarquable, et on met continuellement à profit cette propriété qu'elle a de conserver longtemps sa température. On conçoit aussi qu'à cause de sa chaleur latente 1_k de vapeur d'eau, en se liquéfiant peu à peu, doit maintenir chauds pendant très longtemps les tuyaux des calorifères (1200). Pour tomber à zéro il y a 643 unités de chaleur à dégager (1195) et arrivé là il faut qu'il en perde encore 75 avant de passer entièrement à l'état de glace (1190).

Méthode du refroidissement pour mesurer la chaleur spécifique.

1288. Toutes choses égales, le temps qu'un corps met à se refroidir de 1° est proportionnel à sa chaleur spécifique ; c'est une conséquence de la loi de Newton, mais nous prendrons ce fait comme un résultat d'expérience; on peut en effet s'assurer que dans des circonstances identiques 1^k d'eau met trente fois autant de temps que 1^k de mercure à se refroidir d'un même nombre de degrés. Il résulte de là, pour comparer les chaleurs spécifiques, une méthode qui a fourni des résultats très exacts à MM. Dulong et Petit. Les diverses substances étaient successivement enfermées dans un même vase assez petit pour que la masse eût tous ses points toujours à la même température. Ce vase était suspendu dans un autre beaucoup plus grand, entouré de glace de toute part et formant ainsi une enceinte dont la température était parfaitement

fixe. On faisait le vide dans cette enceinte pour que le refroidissement marchât plus lentement. Une ouverture mastiquée laissait passer la tige d'un thermomètre plongé dans la substance, qui était préalablement échauffee jusqu'à 20 ou 30°. On observait la durée du refroidissement, à partir du moment où l'excès de température était seulement de 10°, cas où la loi de Newton est très exacte. On tenait d'ailleurs compte de la chaleur fournie par le petit vase et par le thermomètre.

Méthode du refroidissement pour mesurer la chaleur latente.

1289. M. Rudberg s'est servi de la méthode du refroidissement pour mesurer approximativement la chaleur latente. Nous donnerons seulement quelques résultats qui mettent bien en évidence l'énorme quantité de chaleur dégagée pendant la solidification.

Durée du refroidissement d'une masse de plomb fondu.

De 340	à 330°	12″	
330	320	171′	Solidification dans l'intervalle.
320	310	16′,5	

Durée du refroidissement d'une masse d'étain fondu.

De 240	à 230°	23″	
230	220	560′	Solidification dans l'intervalle.
220	210	33″	

— pour étudier la composition de certains corps.

1290. En appliquant cette méthode d'observation à différents alliages, M. Rudberg a reconnu pour quelques-uns plusieurs points où la température restait ainsi stationnaire ; cela montre que ces alliages, en apparence homogènes, se composaient réellement chacun de plusieurs alliages en proportions différentes, se solidifiant à différentes températures ; de sorte que le refroidissement devient dans ce cas une méthode d'analyse chimique, qui montre que la loi des proportions définies s'observe dans des cas où on le croyait en défaut.

§ III. *Influence de la conductibilité.*

1291. La conductibilité joue évidemment un très grand rôle dans les phénomènes de l'échauffement et du refroidissement; mais pour bien concevoir ce rôle il est bon de remonter à la cause même de la conductibilité, et c'est ce que nous pouvons faire à présent que nous nous sommes élevés à l'idée de la chaleur rayonnante. Rappelons-nous que les dernières particules des corps sont tenues en équilibre à distance par certaines forces, de sorte qu'elles ne se touchent réellement pas. D'après cela il doit y avoir un rayonnement entre elles comme entre de petits corps isolés; la conductibilité et la transmission de la chaleur au contact rentrent ainsi dans le fait général du rayonnement.

Rayonnement particulaire.

1292. En partant de l'hypothèse que le rayonnement de particule à particule, se fait suivant la loi de Newton, on arrive à des résultats qui s'accordent très bien avec l'expérience, du moins dans de certaines limites. Considérons par exemple une barre métallique dont une extrémité soit en rapport avec une source constante de chaleur, en plongeant dans un foyer, ou mieux en recevant la flamme d'une lampe à niveau constant. D'après la loi, chaque tranche transmet à la tranche suivante une quantité de chaleur proportionnelle à la différence de température. S'il n'y avait aucune perte par le contact de l'air et par le rayonnement extérieur, la barre finirait par acquérir dans toute sa longueur une température uniforme et égale à celle de la source; mais à cause du refroidissement il s'établit un état stationnaire avec des températures décroissantes. Par un calcul fondé sur la loi de Newton, on trouve qu'à 1, 2, 3 décimètres de la source les excès des différentes tranches de la barre sur la température ambiante doivent décroître suivant une progression géométrique quand l'équilibre est établi. Or, des expériences très exactes, notamment celles de M. Despretz, ont confirmé ce résultat du calcul, du moins pour les métaux bons conducteurs. La raison de la progression dépend évidemment de la conductibilité; aussi

Il suit la loi de Newton dans de certaines limites.

Loi des températures d'une barre chauffée par un bout.

celles des différentes substances (1230) a-t-elle été déduite d'expériences de ce genre à l'aide du calcul.

Loi des températures dans une enveloppe.

1293. On conclut encore de la loi de Newton, appliquée au rayonnement particulaire, que dans l'appareil que nous avons indiqué pour la mesure directe de la conductibilité (1230) les températures des couches à des distances égales suivent une progression arithmétique ; c'est-à-dire que si l'épaisseur totale est d'un centimètre, on aura 1° de différence à chaque dixième de millimètre d'épaisseur. En effet, les différentes tranches d'une enveloppe ainsi complète ne se refroidissent ni par l'air ni par le rayonnement extérieur ; quand l'équilibre est établi, toute la chaleur que reçoit l'une doit passer dans l'autre, ce qui exige, d'après la loi, une *même différence* de température entre deux tranches successives quelconques.

Comment les enveloppes empêchent le refroidissement.

1294. On rentre à peu près dans le cas précédent quand on applique une enveloppe sur un corps chaud placé dans un espace froid; et il est facile d'après cela de concevoir pourquoi le refroidissement devient alors quelquefois si lent. Lorsque l'équilibre est établi, la température des couches successives va toujours en décroissant du dedans en dehors, quoiqu'une égale quantité de chaleur les traverse toutes; c'est ce que nous venons de voir. Maintenant, si l'enveloppe conduit mal la chaleur, ou si elle est un peu épaisse, sa surface extérieure se trouvera presque aussi froide que l'air ambiant, quoique l'intérieure puisse être très chaude; alors la perte de chaleur sera presque nulle, car d'après la loi de Newton, elle est proportionnelle à la différence de température.

Applications.

1295. On conçoit très bien d'après cela de quelle manière les vêtements agissent pour préserver du froid; les plus chauds sont précisément ceux dont la surface extérieure se maintient la plus froide. C'est par exemple le cas de la fourrure qui se trouve ordinairement en dehors à la même température que l'air. On explique de même l'effet des enveloppes de paille pour préserver les arbustes de la gelée, l'utilité des matériaux peu conducteurs employés dans la construction des fourneaux, etc.

1296. Quoique l'air soit un très mauvais conducteur et que sa chaleur spécifique soit très petite, il refroidit les corps assez rapidement parce qu'il s'élève dès qu'il est échauffé et qu'il s'établit ainsi un courant continuel. La vitesse du refroidissement dépend de la facilité avec laquelle l'air se renouvelle autour de la surface; aussi varie-t-elle avec la forme du corps, sa position, et les circonstances extérieures. On a constaté qu'il se condensait plus de vapeur dans les tuyaux verticaux des calorifères que dans les tuyaux horizontaux; cela prouve que l'air enlève plus de chaleur aux premiers, et cela se conçoit parce que les courants se meuvent plus facilement tout autour de leur surface, tandis que pour les autres le renouvellement de l'air n'est facile que par la partie inférieure, qu'on trouve en effet moins chaude que la supérieure.

Echauffement et refroidissement par les gaz.

§ IV. *Influence des pouvoirs absorbant, rayonnant, réfléchissant et diathermique.*

1297. Les corps exposés à la chaleur rayonnante s'échauffent plus ou moins vite, suivant le pouvoir absorbant de leur surface; ainsi l'eau mise devant le feu dans un vase d'argent poli s'échauffe bien plus lentement que quand la surface est noircie; en revanche elle se refroidit moins vite.

Influence sur la vitesse d'échauffement.

Les miroirs ardents, à cause de leur grand pouvoir réfléchissant, ne prennent qu'à la longue une certaine élévation de température. Dans les expériences faites avec de grandes lentilles, Tschirnhausen avait observé que les matières noires s'échauffaient plus vite que les matières blanches; il avait aussi remarqué l'influence du pouvoir transmissif; que par exemple l'eau trouble entrait plus vite en ébullition que l'eau claire, et qu'en général les substances opaques s'échauffaient plus promptement que les substances transparentes. Macquer a même vu que des feuilles de verre très minces ne fondaient pas au foyer de la grande lentille de *Trudaine*; on ne pouvait pas y enflammer l'esprit-de-vin, et l'air ne s'y échauffait pas assez pour qu'on observât

un courant ascendant comme au-dessus d'une bougie. Il est évident d'après cela qu'un thermomètre à air à boule transparente serait un très mauvais instrument pour juger de la chaleur du soleil.

Influence sur la limite d'échauffement.

1298. Non-seulement les corps doués d'un grand pouvoir absorbant s'échauffent plus vite, mais ils s'échauffent aussi davantage. Qu'on expose au soleil un thermomètre différentiel ayant une de ses boules argentée et l'autre noircie; on verra que celle-ci finit par prendre une température plus élevée.

Dans le vide toutes les surfaces s'échaufferaient également.

1299. Il est à remarquer que cette différence n'aurait pas lieu dans le vide; tous les corps exposés à la chaleur rayonnante y prendraient la même température, quel que fût leur pouvoir absorbant, *toutes choses égales d'ailleurs;* car si l'un gagne deux fois autant de chaleur parce que son pouvoir absorbant est double, il en perd deux fois autant puisque son pouvoir rayonnant est double aussi (1274). L'égalité de température, si elle existe un instant, devra donc subsister.

Relation entre les pouvoirs rayonnants et les températures finales dans l'air.

1300. Mais dans l'air il y a une autre perte que celle due au rayonnement; et, chose remarquable, l'inégalité de température s'établit quoique le fluide enlève la même quantité de chaleur à égalité de température (1323). En effet, supposons les deux corps arrivés à un état stationnaire; soient, pour un degré d'excès, c la chaleur enlevée par le contact de l'air, r et r' les pertes par le rayonnement; la perte totale à la température t sera, d'après la loi de Newton, $(c+r)\,t$ pour l'un des corps et $(c+r')\,t'$ pour l'autre. Nous mettons t' parce que nous ne savons pas d'avance si les températures sont les mêmes. Puisqu'il y a équilibre, les pertes sont égales aux chaleurs reçues; mais celles-ci sont proportionnelles aux pouvoirs absorbants qui sont égaux aux pouvoirs rayonnants, de sorte qu'en définitive il y a proportionnalité entre les pertes par rayonnement et les chaleurs reçues; on a donc

$$\frac{r}{r'} = \frac{(r+c)\,t.}{(r'+c)\,t'.}$$

ce qui suppose t différent de t', tant que c n'est pas nul,

c'est-à-dire tant qu'on n'est pas dans le vide ; dans le vide on a nécessairement $t' = t$.

1301. Le pouvoir diathermique du verre étant bien plus grand pour la chaleur lumineuse que pour la chaleur obscure, les rayons du soleil traversent plus aisément les vitres d'un appartement que ne peuvent le faire les rayons obscurs provenant des corps qu'ils ont échauffés ; aussi remarque-t-on que la chaleur se concentre, et cela contribue à l'avantage des doubles fenêtres. En faisant tomber les rayons du soleil dans le fond d'une boîte noircie à travers trois vitres distantes de quelques centimètres, Saussure a obtenu une élévation de température de plus de 100°. La superposition des enveloppes contribue d'ailleurs pour beaucoup au phénomène (1294).

Influence de la diathermansie.

1302. Quand on songe aux différences sans nombre qui existent entre les corps sous le rapport des pouvoirs rayonnant réfléchissant, transmissif, etc., on est tenté de croire que l'uniformité de température est impossible dans une enceinte renfermant des substances diverses ; que si cette uniformité existe, on doit nécessairement la troubler en introduisant un corps dont les surfaces seraient de différente nature, et qu'un pareil corps ne peut pas conserver la même température dans tous ses points ; mais l'expérience et le raisonnement s'accordent pour prouver la possibilité d'une température uniforme. Cette uniformité est même le seul état final possible ; nous nous contenterons de la preuve expérimentale. On peut d'ailleurs jusqu'à un certain point concevoir l'équilibre par les compensations, en se rappelant que le pouvoir rayonnant est égal au pouvoir absorbant, qu'un corps réfléchit d'autant moins de chaleur qu'il en émet davantage (1255), et qu'une substance qui transmet facilement la chaleur doit s'échauffer moins et rayonner moins par cela même. Nous observerons seulement qu'il est fort difficile d'obtenir l'uniformité rigoureuse de température dans une enceinte un peu grande, surtout à cause des circonstances extérieures, et qu'en général dans un appartement, par exemple, on trouve toujours avec un thermomètre un peu sensible des différences dans les différents points.

Equilibre de température dans une enceinte.

§ V. *Échauffement annuel et journalier.*

Chaleur reçue par la terre à différentes distances.

1303. Prenons pour unité la distance du centre du soleil au centre de la terre dans une position déterminée; ce sera en même temps à très peu près la distance de deux points quelconques pris sur les deux astres. Soit alors i la chaleur envoyée par un point du soleil à la surface de la terre; $\frac{i}{d^2}$ sera la chaleur envoyée par ce même point quand la distance deviendra d (1245). Pour un autre point on aura au même instant $\frac{i'}{d^2}$, de sorte que la chaleur totale reçue par la terre à cet instant sera $\frac{i + i' + \text{etc.}}{d^2}$; on voit qu'elle est en raison inverse du carré de la distance. Les valeurs extrêmes de la distance sont entre elles :: 30 : 29, d'où il suit que les quantités de chaleur reçues dans ces deux positions sont :: 14 : 15.

Chaleur reçue pendant un temps donné.

1304. Par une compensation remarquable la terre reçoit toujours la même quantité de chaleur pendant qu'elle décrit un degré de l'écliptique; en effet, supposons la distance double, la chaleur sera quatre fois moindre; mais la longueur du degré sera double ainsi que le rayon vecteur, d'où il suit que l'aire décrite par ce rayon sera quadruple. Or cette aire représente le temps mis à parcourir un degré; ce temps sera donc d'autant plus long que la chaleur sera plus faible. On voit d'après cela que la chaleur reçue pendant un temps donné a pour mesure l'arc de l'écliptique décrit pendant ce temps. Pour que le raisonnement fût tout-à-fait exact, il faudrait raisonner non sur un degré, mais sur une fraction infiniment petite de degré, parce qu'à la rigueur la distance change à chaque instant. Cette remarque du reste n'altère en rien la conclusion.

Sa mesure pendant une année entière.

1305. D'après des expériences de M. Pouillet, la chaleur reçue par la terre pendant l'espace d'une année serait capable de fondre une couche de glace de 14 mètres d'épaisseur, en supposant qu'elle tombât toujours perpendiculairement.

1306. C'est pendant le printemps et l'été que la terre est le plus loin du soleil, mais comme ces deux saisons durent huit jours de plus que les deux autres, en définitive la chaleur reçue est la même. Le théorème précédent montre que la compensation est parfaite puisque les arcs décrits sur l'écliptique sont de 180° chacun. Il s'ensuit aussi que les deux hémisphères reçoivent la même quantité de chaleur quoique leur température soit différente (884).

Elle est la même pendant l'été et pendant l'hiver.

1307. Si la chaleur reçue par la totalité de la terre reste la même dans toutes les saisons, il y a de grandes variations dans celle qui tombe sur les différents lieux ou sur le même lieu à différentes époques. Pour l'hémisphère boréal les jours sont plus longs pendant le printemps et l'été et les rayons du soleil moins obliques. Par cette double raison la chaleur doit être plus grande. Dans les contrées du Nord où le soleil reste vingt heures et plus sur l'horizon, la température peut s'élever momentanément beaucoup plus haut que dans des contrées plus méridionales, et même, terme moyen, pendant l'été il fait plus chaud, par exemple, à Moscou qu'à Paris (886). On conçoit même que le rayonnement qui a lieu pendant les longues nuits d'hiver est une cause extrêmement puissante de refroidissement.

Causes des différences de température :

1° Longueur des jours.

1308. Quant à l'obliquité des rayons, il est bien facile de concevoir son influence. On peut considérer l'horizon réel d'un lieu comme un plan circulaire, et il est évident que ce plan, qui a une largeur déterminée, recevra bien plus de rayons s'ils approchent d'être perpendiculaires ; s'ils étaient parallèles au plan il n'y en aurait aucun d'arrêté. D'ailleurs la chaleur qui tombe très obliquement se réfléchit en plus grande quantité, ce qui est une nouvelle cause de perte.

2° Obliquité des rayons.

1309. Si on suppose l'atmosphère toujours également pure, et si on néglige les inégalités qui empêchent le sol d'être horizontal, on voit que la chaleur donnée à chaque instant par les rayons du soleil doit aller en augmentant jusqu'à midi ; c'est alors en effet que les rayons ont à traverser la plus petite épaisseur d'air et qu'ils approchent le plus d'être perpendiculaires. Au moment du lever l'épaisseur traversée est de plus de 200 lieues, et cette épaisseur se com-

Pourquoi le soleil est plus chaud à midi.

pose en grande partie de couches très denses et mêlées de vapeurs bien moins diathermanes que l'air pur.

Pourquoi la plus grande chaleur n'a pas lieu à midi.

1310. Ce n'est cependant pas à midi qu'a lieu le maximum de température (880), et il est facile d'en voir la raison. Le maximum aurait évidemment lieu au coucher du soleil si le sol conservait toute la chaleur qu'il reçoit; si au contraire il la perdait presque immédiatement, la plus grande élévation s'observerait à midi. Or il perd de la chaleur, et il n'en perd que peu à peu; par conséquent l'instant où il en a le plus doit arriver entre midi et le coucher du soleil. Par un raisonnement analogue on verrait que le maximum de température ne doit pas avoir lieu au solstice d'été, mais un peu après comme d'ailleurs l'observation le prouve.

Comment la terre perd la chaleur qu'elle reçoit du soleil.

1311. Le refroidissement qui suit le coucher du soleil vient de ce que les corps ne reçoivent plus de chaleur, tandis qu'ils continuent à en perdre par le rayonnement qui a encore lieu, comme nous savons, aux plus basses températures. L'air, il est vrai, rend en partie la chaleur qu'il a enlevée pendant le jour (867), et une portion de celle qui est rayonnée par le sol est encore absorbée par l'atmosphère, mais le reste va se perdre dans les espaces célestes. Il faut en définitive que dans le cours de l'année la terre perde ainsi par son rayonnement toute la chaleur qu'elle a reçue du soleil, car la température moyenne de sa surface ne varie pas. Seulement d'un jour à l'autre il y a perte ou gain suivant le temps que le soleil reste sur l'horizon. Il est d'ailleurs évident que la chaleur perdue est plus grande pendant le jour que pendant la nuit, puisque le rayonnement croît avec l'excès de température.

Influence d'un ciel serein.

1312. C'est surtout dans un lieu bien découvert et par un ciel sans nuage que la perte par le rayonnement est considérable; l'eau peut alors se geler même quand l'atmosphère est au-dessus de zéro. Au Bengale on obtient de la glace en exposant de l'eau pendant la nuit dans des vases peu profonds, établis sur une couche de paille pour les isoler du sol. Il existait, il y a quelques années, une fabrique de ce genre dans la plaine Saint-Denis, près de Paris; mais le procédé de conservation dans les glacières est plus

économique. Il ne faudrait pas croire que le refroidissement, dans ce cas, soit dû à l'évaporation, car il a encore lieu même quand l'air est saturé et pendant des nuits où il se forme de la rosée, de sorte que la glace obtenue pèse quelquefois plus que l'eau exposée.

Pour montrer encore l'influence d'un ciel découvert sur le refroidissement, nous citerons un fait remarquable noté par M. Arago. En 1762, la Seine était complétement prise, après 6 jours de gelée, dont la température moyenne était de —3°,9 et sans que le plus grand froid eût dépassé —9°,7; tandis qu'en 1748, la rivière coulait encore, après 8 jours d'une température moyenne de —4°,5, le froid ayant été jusqu'à —12°. La hauteur de l'eau était la même aux deux époques; mais en 1762 les 6 jours de gelée furent parfaitement sereins, tandis qu'en 1748 le ciel était nuageux ou totalement couvert. Le thermomètre n'indiquait que la température de l'air, celle du sol était peut-être de 10 à 12° plus basse, à cause du rayonnement.

Par le rayonnement nocturne les plantes peuvent descendre à 6 ou 7° au-dessous de la température de l'air; aussi les bourgeons sont souvent *roussis* par la gelée quand le ciel est découvert à l'époque de leur développement, c'est-à-dire, en avril. Par cela même que le ciel est découvert la lune est visible; de là le préjugé qui accusait son influence, et avait fait donner le nom de *lune rousse* à celle qui commence en avril.

1313. Ce froid qui a lieu par un ciel serein, tient au faible rayonnement de l'air qui, même quand il est très chaud, émet fort peu de chaleur (1252). Nous ne devons donc pas nous attendre à en recevoir sensiblement des régions souvent glacées de l'atmosphère. Aussi lorsque pendant une nuit sereine on tourne vers le ciel un miroir concave ayant un thermomètre à son foyer (ou mieux encore un thermo-multiplicateur), on observe un abaissement très considérable, dû évidemment à ce que les rayons provenant de l'atmosphère sont infiniment moins chauds que ceux qui viennent des corps terrestres. Un nuage ou même un

Faible rayonnement de l'atmosphère.

brouillard à peine visible passant dans la direction du miroir tempèrent notablement le froid, de sorte que cette expérience pourrait dans certains cas, mieux encore que la vue, faire juger de la pureté du ciel.

Influence des abris.

1314. On est étonné de voir le rayonnement des nuages tempérer le refroidissement d'une manière aussi efficace; mais il faut remarquer que les nuages ont en général une température supérieure à celle du milieu où ils se trouvent (1126); la chaleur qu'ils envoient est quelquefois assez sensible pour être appréciée par nos sens. Ainsi quand on voyage par une nuit froide et sereine sur l'impériale d'une voiture on se sent manifestement réchauffé si le ciel vient à se couvrir. D'ailleurs les expériences du docteur Wells montrent combien est grande l'influence des abris les plus légers pour tempérer le refroidissement; sous une simple mousseline tendue sur des piquets, il a vu le gazon de plusieurs degrés moins froid qu'à l'air libre. On fait prendre quelquefois un voile aux voyageurs qui visitent les glaciers, où l'on n'arrive qu'après une marche échauffante. On tempère ainsi la perte très considérable qui aurait lieu par le rayonnement, au milieu d'une enceinte glacée, et par un ciel découvert; sans cette précaution il n'est pas rare d'observer, surtout chez les jeunes gens, des gerçures au visage et un renouvellement de l'épiderme.

Théorie de la rosée.

1315. Nous avons vu que la cause prochaine de la rosée était le refroidissement du sol (1118); maintenant nous pouvons nous rendre compte des diverses particularités de ce phénomène, puisque nous connaissons les circonstances qui influent sur le refroidissement nocturne. D'abord, il est évident que si la rosée s'observe surtout après une journée chaude, c'est que l'évaporation ayant été plus grande et l'air étant plus près d'être saturé, un moindre refroidissement suffit pour animer la précipitation de la vapeur. Par la même raison la rosée est plus abondante après certains vents humides, ceux du sud-ouest en France, ceux du nord en Égypte, etc. En général, le vent empêche la formation de la rosée parce que le sol continuel-

lement réchauffé par l'air qui se renouvelle ne peut pas devenir plus froid que lui. L'influence si connue d'un ciel serein tient, comme nous savons, à ce que le sol perd alors beaucoup par le rayonnement. De même on prévoit qu'il doit y avoir plus de rosée dans un lieu découvert que dans un lieu abrité. Quant à celle qu'on voit si souvent pendant l'hiver sur les vitres à l'intérieur des appartements où quelquefois elle gèle en formant des arborisations variées ; on peut remarquer qu'elle se forme spécialement sur les vitres d'où l'on découvre la plus grande partie du ciel ou la partie la plus froide. Si la gelée blanche s'observe plus particulièrement sur les toits exposés au nord, c'est que la région nord de l'atmosphère est plus froide, n'étant pas échauffée dans le jour par les rayons du soleil que réfléchissent les bâtiments exposés au midi. On sait que, toutes choses égales, la rosée se dépose de préférence sur les corps mauvais conducteurs, doués d'un grand pouvoir rayonnant, comme le verre, le bois, l'herbe, la laine, le duvet, etc. ; cela est facile à concevoir ; leur surface se refroidit très vite par le rayonnement, et le défaut de conductibilité s'oppose à ce que la chaleur des parties plus profondes vienne réparer la perte. Il n'en est pas de même des métaux; la chaleur du sol se transmet facilement à leur surface, qui en outre rayonne peu, surtout quand elle est bien polie. Il est à remarquer que les métaux oxidables se couvrent de rosée plutôt que les autres ; en général, les propriétés chimiques et l'état électrique des différentes substances jouent un certain rôle dans le phénomène de la rosée, mais le refroidissement préalable reste en définitive la cause fondamentale. Il ne faut cependant pas croire que les corps sur lesquels on trouve le plus de rosée doivent être toujours les plus froids, car la liquéfaction même de la vapeur est une cause puissante de réchauffement (1195).

1316. Rigaud de Lisle a fait une application remarquable de la propriété qu'ont certains corps de se couvrir abondamment de rosée; ils recueillait ce liquide dans l'intention d'y rechercher les substances fort peu connues, Application remarquable.

qu'on désigne sous le nom de miasmes. Près de Rome, dans un lieu où l'*aria cattiva* produisait ses effets délétères il avait établi son appareil, consistant tout simplement en un carreau de verre incliné dont un angle aboutissait à une bouteille. On en remplit deux en une seule nuit; elles furent analysées six mois après par Vauquelin qui y trouva une matière animale en flocons, de l'ammoniaque, du chlorure de sodium et du carbonate de soude; l'eau était restée limpide; elle avait une odeur légèrement sulfureuse qu'on n'avait pas sentie lorsqu'on l'avait recueillie.

§ VI. *Lois de Dulong et Petit.*

Inexactitude de la loi de Newton.

1317. La loi de Newton n'est véritablement qu'une règle empirique sans fondement rationnel. Elle tient compte seulement de la différence de température et point du tout de la température elle-même; les effets du rayonnement s'y trouvent confondus avec ceux du contact de l'air; tout ce qui dépend de la forme du corps, de son pouvoir rayonnant, etc., y est évalué implicitement par la raison q (1277), sans qu'aucune discussion ait établi la légitimité d'une évaluation pareille. Aussi l'inexactitude se manifeste dès qu'on sort des températures atmosphériques; et même dans les limites où elle s'accorde le mieux avec l'expérience, la loi de Newton ne doit certainement pas être considérée comme la véritable loi du refroidissement. Ce phénomène d'ailleurs a lieu dans des circonstances si différentes qu'il ne peut pas y avoir une loi unique, indistinctement applicable à tous les cas.

Procédé pour étudier le refroidissement.

1318. On doit à MM. Dulong et et Petit les véritables lois du refroidissement dans le vide et dans les gaz. Essayons de nous faire une idée de la marche qu'ils ont suivie et des résultats qu'ils ont obtenus. Pour ne pas compliquer le phénomène des effets de la conductibilité, il faut évidemment étudier le refroidissement d'un simple point matériel; or, on s'approche autant qu'on veut de cette abstraction en prenant des corps très petits ou des liquides dans lesquels les courants entretiennent l'unifor-

mité de température. Plusieurs de ces corps peuvent être simplement des thermomètres de différente nature, de différente forme, de différent volume; quant aux autres, un thermomètre plongé dans leur masse donnera leur température. Qu'on imagine maintenant un ballon en cuivre mince, pour qu'il se mette facilement en équilibre de température, et noirci intérieurement pour qu'il ne réfléchisse pas la chaleur; en le tenant plongé dans la glace, dans l'eau ou dans une huile fixe, on pourra faire varier sa température depuis 0° jusqu'à 300°, et la maintenir un temps quelconque à tel degré qu'on voudra. C'est dans cette enceinte qu'on suspendra les corps sur lesquels on veut étudier le refroidissement, après leur avoir préalablement donné un excès connu de température dont la variation sera indiquée à chaque instant sur la tige thermométrique sortant du ballon. On observera successivement ainsi la marche du phénomène dans l'enceinte vide, puis dans l'enceinte pleine d'air ou d'un gaz quelconque, à tel ou tel degré de force élastique.

1319. On voit d'après cela quel immense travail on doit faire seulement pour obtenir des séries d'observations; encore ces séries sont-elles nécessairement incomplètes puisqu'on ne peut pas observer continuellement; on sent donc la nécessité d'interpoler (1020). Pour cela MM. Dulong et Petit, après avoir pris dans chaque cas un certain nombre d'observations thermométriques, ont construit avec trois d'entre elles une formule qui représentait exactement toutes les autres et par conséquent celles qu'ils n'avaient pas prises. Leur formule était celle de Newton modifiée; mais pour plus d'exactitude ils partageaient la durée totale du refroidissement en plusieurs intervalles, et pour chacun se servaient d'une formule appropriée. Avec cette série de formules ils pouvaient avoir la température de seconde en seconde, pendant toute la durée du refroidissement. Chaque expérience dureste nécessitait un travail du même genre.

Procédé pour compléter les séries d'observations.

1320. Afin d'avoir la marche du refroidissement dans le vide absolu, ils ont étudié cette marche dans de l'air à

Procédé pour tenir compte de l'imperfection du vide.

différents degrés d'élasticité, et d'après la loi qui s'est manifestée ils ont pu calculer ce qui aurait eu lieu dans le cas d'une élasticité nulle, c'est-à-dire dans le vide parfait.

Proportionnalité des vitesses de refroidissement.

1321. La *vitesse* avec laquelle un corps se refroidit à un instant déterminé peut se mesurer par l'abaissement de température en une seconde; or en examinant les résultats obtenus par les procédés que nous venons d'indiquer, après avoir rapporté toutes les températures au thermomètre à air (933), MM. Dulong et Petit ont reconnu que la vitesse de refroidissement était soumise à des lois très remarquables. Ces lois sont les mêmes pour tous les corps, quelle que soit leur nature. Les variations de forme et de volumes sont aussi sans influence, du moins tant qu'elles n'empêchent pas l'uniformité de température. Si donc deux corps différents sont placés dans les mêmes circonstances, avec un même excès de température, et que le refroidissement de l'un pendant la première seconde ait été par exemple trois fois aussi grand que celui de l'autre, il y aura toujours la même proportion dans les vitesses de refroidissement pour des excès de température égaux quelconques.

Refroidissement par le rayonnement.

1322. La vitesse de refroidissement dans le vide dépend non-seulement de la différence θ entre la température du corps et celle de l'enceinte, mais aussi de la température t de l'enceinte ; la relation est exprimée par la formule

$$v = m\, a^{t} (a^{\theta} - 1)$$

a est le nombre invariable 1,0077 ; m est un coefficient constant qui dépend du corps que l'on considère ; on le détermine par la formule même en mesurant directement une valeur de v, c'est-à-dire un abaissement de température pendant un temps très court, par exemple pendant une minute, ce qui donne en général une approximation suffisante. Mettant le nombre obtenu avec les valeurs correspondantes de t et de θ, on n'a plus qu'à tirer m et la formule donne ensuite v pour toutes les valeurs simul-

tanées de t et de θ. Il ne faut pas oublier que les températures doivent être comptées sur le thermomètre à air (933).

1323. La vitesse du refroidissement par le contact d'un gaz dépend seulement de la différence de température et de la pression ; le poli de la surface, son pouvoir absorbant, etc., sont sans influence. La vitesse de refroidissement ne varie pas lorsque la densité du gaz vient à changer, pourvu que la pression reste la même. Le refroidissement est un peu plus que double quand la différence de température est doublée; si, par exemple, dans le premier cas il a été de 1° en 1', il sera dans le second de 2° 35; par approximation on peut admettre la proportionnalité. Quant aux différents gaz, on observe que les plus légers sont ceux qui refroidissent le plus vite, sans doute à cause de la mobilité plus grande de leurs molécules. Par exemple, si sous la pression 0m,76 l'air a fait baisser un thermomètre de 1° en 1', l'hydrogène dans les mêmes circonstances le ferait baisser de 3°,45, l'acide carbonique de 0°,965.

Refroidissement par les gaz.

La nature de la surface est sans influence ;

Influence de la différence de température,

— de la pression.

1324. Afin qu'on puisse juger des valeurs relatives du refroidissement par le rayonnement et par l'air, nous rapporterons les résultats de quelques expériences de MM. Dulong et Petit.

Comparaison des deux modes de refroidissement.

Excès de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte.	Vitesse de refroidissement dans l'air.	Vitesse dans le vide.	Différence ou vitesse due au contact de l'air.
200°	14,04	8,56	5,48
180	11,76	7,01	4,75
160	9,85	5,68	4,17

Ici il s'agissait d'un thermomètre en verre à surface naturelle; on voit que surtout dans les hautes températures il perdait plus de chaleur par le rayonnement que par le contact de l'air. C'était le contraire avec la surface argentée comme le montrent les résultats suivants obtenus dans des circonstances pareilles; on remarquera de plus que la perte par l'air reste la même malgré le changement de la surface.

200°	6°93	1,50	5,43
180	6,02	1,25	4,79
160	5,19	1,00	4,19

CHAPITRE X.

PRODUCTION ET NATURE DE LA CHALEUR.

§ I. *Chaleur produite par la combustion.*

Ce que c'est que la combustion.

1325. La *combustion* consiste dans une combinaison chimique pendant laquelle il se produit de la chaleur et de la lumière. Quand, par exemple, le charbon *brûle,* c'est qu'il se combine avec l'oxigène ; c'est un fait que la chimie a depuis longtemps mis hors de doute. Le résultat de la combinaison est un gaz qui ordinairement se perd dans l'atmosphère ; mais on peut le recueillir et même en retirer le charbon en totalité, de sorte que la combustion n'anéantit réellement rien. La combustion du reste ne s'effectue que dans des circonstances données; il faut une certaine température; mais quand une fois le phénomène a commencé dans quelques points, la chaleur produite par l'action chimique suffit pour faire rougir toute la masse et maintenir l'incandescence jusqu'à la fin. Nous avons pris la charbon et l'oxigène pour exemple, mais il peut y avoir combustion entre beaucoup d'autres corps, entre l'hydrogène et le chlore, le chlore et le phosphore, le soufre et le cuivre, etc. ; il est bon de noter cependant que dans les combustions ordinaires l'oxigène fourni par l'air est toujours un des éléments de la combinaison.

Idée qu'on doit se faire de la flamme.

1326. Lorsque la combustion a lieu entre des gaz, ou lorsqu'il se produit des gaz pendant la combustion, ceux-ci

s'échauffent jusqu'à l'incandescence et constituent la *flamme*. Dans les flammes ordinaires l'incandescence se borne à la couche très mince qui est en contact avec l'air; à l'intérieur la température est si peu élevée que dans les lampes à alcool, qui donnent tant de chaleur, la mèche se carbonise à peine. Il est à noter qu'on ne peut pas juger de la température d'une flamme par la vivacité de la lumière; la flamme d'un mélange d'oxigène et d'hydrogène, qui est la plus chaude que l'on connaisse, est à peine visible.

Effet des toiles métalliques sur la flamme.

1327. La température de la flamme est extrêmement élevée, mais sa chaleur est peu considérable à cause du peu de masse; aussi le contact d'un corps froid lui fait-il aisément perdre son incandescence; on sait qu'elle ne peut pas traverser une toile métallique froide, à mailles un peu serrées; c'est là-dessus qu'est fondée la *lampe de sûreté* de Davy. Dans certaines mines de houille il se dégage du gaz hydrogène carboné qui avec l'air produit un mélange explosif auquel on court risque de mettre le feu avec une lampe ordinaire. On évite le danger avec une lampe entourée d'une toile métallique; il peut bien y avoir inflammation du mélange dans l'enceinte formée par cette toile, mais la flamme qui résulte de cette explosion se trouve tellement refroidie, en traversant les mailles, qu'elle ne peut mettre le feu au gaz extérieur. Dans le chalumeau à gaz (561) le tube à l'extrémité duquel on allume le mélange contient une centaine de rondelles de toile métallique pour empêcher l'inflammation de se communiquer à l'intérieur.

Mesure de la chaleur produite par la combustion.

1328. C'est une question qui intéresse à la fois la physique et l'économie industrielle que de mesurer la chaleur produite par la combustion des diverses substances. On s'est occupé spécialement du cas où la combustion se fait par l'oxigène. Le procédé consiste en général à brûler un poids déterminé de la substance que l'on considère dans une enceinte disposée de telle sorte qu'on puisse recueillir et mesurer toute la chaleur dégagée. Lavoisier et Laplace se servaient du calorimètre de glace (1188); Rumford,

Despretz ont mesuré la chaleur par l'échauffement de l'eau, Marcus Bull par l'échauffement d'une enceinte de grande dimension. Nous donnerons ici le tableau des principaux résultats.

1329. *Table de la chaleur donnée et de l'oxigène absorbé par 1^k des différents combustibles.*

Pouvoirs calorifiques à poids égal.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	UNITÉS DE CHALEUR.	OXIGÈNE ABSORBÉ.
Hydrogène pur	23640	8^k,01
Cire blanche	9479	3 ,1
Huile de colza épurée	9307	»
Huile d'olive	9044	3 ,0
Suif	8369	3 ,1
Ether sulfurique $d = 0,728$	8030	2 ,5
Carbone pur	7914	2 ,616
Phosphore	7500	1 ,5
Huile de naphte, $d = 0,827$	7338	3 ,2
Charbon de bois	7300	2 ,6
Hydrogène bicarboné	6600	3 ,3
Coke	6500	2 ,2
Charbon de tourbe	6400	»
Alcool à 42°	6195	2 ,4
Houille grasse moyenne	6000	2 ,2
Alcool à 33°	5261	»
Essence de térébenthine	4500	3 ,2
Bois parfaitement sec	3500	1 ,3
Tourbe de bonne qualité	3000	»
Bois séché à l'air	2600	1
Oxidede carbone	1800	0 ,57

Remarques.

1330. On voit que la chaleur donnée augmente avec la quantité d'oxigène absorbé; mais la proportion n'est pas exacte. Il y a même des anomalies très fortes pour le phosphore, l'huile de naphte, l'essence de térébenthine et le gaz de l'éclairage; le premier absorbe peu d'oxigène pour produire beaucoup de chaleur, les autres en absorbent beau-

coup, sans donner une chaleur très forte. Au reste, ce tableau présente plutôt des résultats économiques que scientifiques; on n'y tient compte que de la chaleur qui devient libre et point du tout de celle qui peut rester latente dans les liquides ou dans les gaz produits par la combustion. Plusieurs des évaluations sont certainement trop faibles, parce que dans le procédé de Rumford on perd une partie de la chaleur rayonnante. Les seuls résultats qu'on puisse regarder comme bien exacts sont ceux relatifs à l'hydrogène et au carbone pur; ils sont dus à M. Despretz.

Les différents expérimentateurs ont trouvé des différences considérables dans la chaleur produite par un même poids du même combustible; on attribue ces différences à des erreurs d'observation, et on admet que la chaleur dégagée est toujours la même de quelque manière que la combustion se fasse. Mais cette question mériterait de nouvelles recherches.

1331. Il est facile, avec le tableau précédent, de calculer la quantité d'eau que peut faire bouillir un poids donné de tel ou tel combustible. Si par exemple il n'y avait aucune perte, 1^k de houille ferait bouillir 60^k d'eau (1142). Le même poids fondrait 80^k de glace (1185), ou volatiliserait $9^k,3$ d'eau prise à zéro (1195). Mais ces résultats sont des limites qu'on ne peut atteindre avec les dispositions en usage. Tout au plus volatilise-t-on 6^k d'eau avec 1^k de houille; généralement même on n'en retire pas plus de 3600 unités de chaleur. Applications.

1332. Il n'y a pas de grandes différences dans le pouvoir calorifique des différents bois mesurés au poids, mais il y en a de grandes quand on mesure au volume, comme on le verra dans le tableau suivant, calculé par M. Peclèt; on y prend pour unité le *kilotherme* ou mille unités de chaleur. Pouvoirs calorifiques à volume égal.

Chaleur donnée par

	Une corde de bois d'une année de coupe.	Un hectolitre de charbon.
Noyer	7742	292
Chêne	6846	255
Frêne	5974	219
Hêtre	5603	176
Orme	4487	167
Bouleau	4102	153
Châtaignier	4035	146
Charme	5572	176
Pin	4263	160
Peuplier d'Italie	3069	109

Un hectolitre de houille moyenne donne........ 480
Un hectolitre de coke........................ 182

La corde dont on parle ici est de 4 stères.

Valeur relative des combustibles.

1333. Connaissant le prix des différents combustibles, il est aisé maintenant de juger leur valeur relative; à Paris, par exemple, la houille vaut ordinairement 4 f. 40 c. l'hectolitre, le coke 2 f. 85 c., le charbon de bois 4 fr., la corde de hêtre 70 fr.; on trouve d'après cela pour le prix de mille unités de chaleur par la houille 0,009, par le bois 0,012, par le coke 0,015, par le charbon de bois 0,025. Ainsi à Paris le chauffage par le charbon de terre est le plus économique.

Leur pouvoir rayonnant.

1334. D'après les expériences de M. Peclet, la chaleur rayonnante que le charbon donne pendant sa combustion est environ le tiers de la chaleur totale; pour la houille et le coke la proportion est plus forte, mais pour le bois elle n'est guère que le quart, et elle ne s'élève pas même au sixième dans les appareils d'éclairage, ce qui montre encore que la flamme rayonne beaucoup moins que les corps solides (1255).

Chauffage des appartements.

1335. Dans le chauffage par les cheminées ordinaires on

n'utilise réellement que la chaleur rayonnante, dont il n'y a guère que le quart qui soit dirigé vers l'appartement; de sorte que quand on brûle du bois, on perd les 15 seizièmes de la chaleur produite. L'effet utile peut aller au huitième dans les cheminées bien construites, où le foyer est peu profond, les parois convenablement inclinées et douées d'un grand pouvoir réfléchissant. Le cuivre poli, sous ce rapport, est préférable à la faïence (1258). Du reste les rayons directs ou réfléchis n'échauffent pas l'air immédiatement (1297), ils vont tomber sur les murailles ou les meubles, contre lesquels l'air vient ensuite s'échauffer. Aussi obtient-on bien plus vite une douce température avec les cheminées-poêles et les poêles proprement dits. En outre, la dépense est beaucoup moindre; dans des expériences faites au Conservatoire des Arts et Métiers de Paris, on a trouvé que, pour obtenir une même élévation de température, il fallait brûler un poids de combustible représenté par

100 dans une cheminée ordinaire;
39 dans une cheminée de Rumford;
33 dans une cheminée de Désarnod;
21 dans un poêle de Curandeau en tôle;
16 dans un poêle de Désarnod, en fonte et en tôle.

1336. Comme application, calculons la quantité de bois nécessaire pour maintenir une chambre à 20°, la température extérieure étant à 0°. La perte par les murs peut être négligée, mais il faut tenir compte du refroidissement par les vitres. Pour une différence de 1° on admet une perte de 11,35 unités de chaleur par mètre carré et par heure; ici, d'après la loi de Newton, nous aurons 227 unités ou 1362, s'il y a 6 mètres carrés de surface de vitres. Supposons qu'il y ait 20 personnes dans la chambre; il faut, terme moyen, à chacune un mètre cube d'air par heure; la ventilation demandera donc 140^{m} pesant 182^{k}; il faut par conséquent 900 unités de chaleur pour porter cet air pris au dehors de 0 à 20° (1156). Ainsi la quantité totale de Application.

chaleur à fournir sera de 2272 unités par heure; $\frac{1}{608}$ de stère de bois de hêtre suffirait, s'il n'y avait pas de perte; mais comme l'effet utile dans une cheminée ordinaire n'est que $\frac{1}{16}$ de l'effet total, on devra brûler par heure $\frac{1}{38}$ de stère, ce qui fait un poids de 10, 5; dans une cheminée à la Désarnod le tiers suffirait, et avec un poêle il ne faudrait que 1^k,68.

Fourneaux à haute température.

1337. Dans les arts où l'on a besoin de températures très élevées on réunit plusieurs circonstances très importantes sous le rapport de l'économie et de l'effet à obtenir. Ainsi, autant que possible, on chauffe d'une manière continue, afin d'éviter la perte de chaleur qui a nécessairement lieu dans la mise en train; les hauts fourneaux pour faire la fonte marchent sans discontinuer des années entières. Il y a évidemment de l'avantage à opérer en grand; une masse considérable de combustible perd moins que si elle était divisée, et on obtient une chaleur beaucoup plus forte. La combustion doit se faire avec une grande rapidité; c'est une condition de la plus haute importance; on la remplit de diverses manières. Dans les verreries, par exemple, le bois refendu et parfaitement sec brûle si rapidement qu'il ne produit aucune fumée; aussi n'y a-t-il pas de cheminée au-dessus du four. Avec les petits fourneaux de coupelle on n'obtient pas la fusion de l'or ou de l'argent, si le charbon n'est pas en petits morceaux laissant une certaine quantité d'air entre eux. Dans les hauts fourneaux, outre le tirage, on a encore pour activer la combustion le courant d'air forcé que donnent les machines soufflantes (562). On a reconnu dans ces derniers temps qu'il y avait un très grand avantage à chauffer cet air d'avance à 4 ou 500°.

Perte remarquable de chaleur.

1338. En général la perte de chaleur est énorme dans les opérations qui exigent une haute température. Par exemple, dans les fourneaux à fondre la fonte on brûle, terme moyen, $\frac{1}{2}$ kil. de houille par kil. de fonte. Or, d'après une expérience de M. Clément, 1 kil. de fonte en fusion, projeté dans 20 kil. d'eau à 0°, en élève la température à 14°; il contient, par conséquent, 280 unités de

chaleur ; mais comme $\frac{1}{2}$ kil. de houille en donne 5000, on voit que la perte est de plus des neuf dixièmes. Dans plusieurs industries on utilise maintenant de diverses manières le courant d'air excessivement chaud que les fourneaux laissent échapper; on s'en sert pour la fabrication de la chaux, la préparation de la soude, l'échauffement des tuyaux contenant l'air poussé par les machines soufflantes, etc.

§ II. *Sources de chaleur.*

1339. La combustion que nous venons d'étudier comme le moyen le plus fréquemment employé d'obtenir de la chaleur n'est qu'un cas particulier du phénomène général de la production de la chaleur par les actions chimiques. Actuellement nous examinerons quelques cas encore très remarquables, quoiqu'ils n'aient pas autant d'importance sous le point de vue économique.

1° Sources accidentelles. Chaleur produite par les actions chimiques.

1340. Lavoisier et Laplace, en mêlant 734 gr d'eau avec 979 d'acide sulfurique concentré, ont obtenu assez de chaleur pour fondre 1529gr de glace. Un mélange de 12 k,5 de ce même acide, avec 5 k d'eau, donne une température de 130°. L'huile de gayac prend feu quand on la mêle avec de l'acide nitrique très concentré ; il suffit d'opérer sur une once de chaque substance.

Combinaison de deux liquides.

1341. Un grand nombre de gaz s'échauffent subitement par leur action réciproque ; c'est ce qu'on voit avec le chlore et l'hydrogène sulfuré ou l'hydrogène bicarboné; avec le gaz ammoniac il y a même dégagement de lumière. On sait aussi que l'hydrogène perphosphoré s'enflamme dans l'air à la température ordinaire.

Combinaison de deux gaz.

1342. L'action chimique entre deux corps solides est, en général, trop peu énergique pour qu'il y ait une élévation appréciable de température ; cependant il y a production de chaleur pendant le mélange de la chaux et du sel ammoniac, et surtout par l'action de la glace sur les acides sulfuriques ou phosphoriques anhydres.

Combinaison de deux solides.

1343. La chaleur due à l'action chimique des liquides

Combinaison d'un solide et d'un liquide.

sur les solides se manifeste dans une foule de cas; ainsi, quand on verse de l'eau sur de la chaux il y a un échauffement très considérable et qui peut aller jusqu'à enflammer de la poudre; la baryte rougit quand on la mouille avec l'acide sulfurique concentré; ce même acide enflamme, comme on sait, les allumettes dites oxigénées; le potassium qu'on fait passer sous une éprouvette pleine d'eau y devient incandescent; le charbon qui résulte de la calcination de l'émétique rougit et produit une violente explosion dès qu'on vient à l'humecter.

Combinaison d'un solide et d'un gaz.

1344. Les pyrophores, l'inflammation spontanée d'un mélange de phosphore et d'oxide de phosphore dans l'air, celle du phosphore dans le chlore, etc., montrent assez qu'il peut se produire de la chaleur par l'action des substances gazeuses sur les solides.

Combinaison d'un liquide et d'un gaz.

1345. Il s'en produit aussi quand les gaz se combinent avec des liquides, par exemple, pendant la combinaison du gaz hydrochlorique ou du gaz ammoniac avec l'eau. Il y a même dégagement de lumière quand on fait arriver un courant de chlore dans l'ammoniaque liquide.

Remarques.

1346. Dans les cas que nous venons d'indiquer, les substances sont à la température ordinaire; dans d'autres cas la combinaison ne commence qu'à une température un peu élevée, mais la chaleur qu'on donne ainsi d'abord n'est rien en comparaison de celle qui se produit ensuite. C'est ce qu'on voit dans la combustion ordinaire, dans l'inflammation des gaz, dans celle de la poudre, etc.

Quelquefois la chaleur qui résulte d'une action chimique est si faible qu'elle échappe aux sens; mais on peut la reconnaître par d'autres moyens. Ainsi un bâton de phosphore qui paraît lumineux dans l'obscurité mais sans chaleur sensible, affecte le thermomètre multiplicateur (1252). D'ailleurs, quand on opère sur une certaine masse, la température peut s'élever assez pour déterminer l'inflammation; aussi dans la préparation de l'acide qui résulte de la combustion lente du phosphore, a-t-on bien soin d'isoler chaque bâton dans un petit entonnoir de verre. La chaleur qui se développe dans la pâte faite avec

l'eau, la limaille de fer et le soufre est à peine appréciable sur de petites masses ; mais en opérant sur une trentaine de kilogrammes on obtient des effets tels que Lemery a eu l'idée de les comparer à ceux d'un volcan. De même, dans la fermentation, la chaleur peut devenir très considérable quand la masse est grande ; on sait que des meules de foin humide peuvent s'enflammer et que des toiles peintes entassées, encore fraîches, ont quelquefois pris feu.

La chaleur qui devient sensible dans les actions chimiques n'est souvent encore qu'une partie de celle qui se produit. Une portion considérable peut devenir latente par les changements d'état, comme la fusion et la volatilisation. Dans les mélanges réfrigérants, le froid dû à la liquéfaction compense et au-delà l'élévation de température qui résulterait de l'action chimique considérée isolément.

Chaleur produite par des actions physiques.

Adhésion des liquides.

1347. Leslie avait observé une certaine élévation de température en humectant un linge qui enveloppait la boule d'un thermomètre; M. Pouillet a généralisé le fait et a constaté qu'il se produisait de la chaleur toutes les fois qu'un liquide *mouillait* un solide, lors même qu'il n'y avait aucune action chimique. L'effet ne dépasse guère un quart de degré pour les substances inorganiques, telles que le verre, les métaux, etc., soit qu'on les mouille avec de l'eau, de l'alcool, de l'huile, ou différents acides. Mais en humectant avec de l'eau certaines substances organiques, préalablement desséchées, par exemple, des membranes réduites en petits fragments, on obtient une élévation de température qui va jusqu'à 10°.

Adhésion des gaz.

1348. On sait que les gaz adhèrent avec une force remarquable à certains métaux (115) et à plusieurs autres substances, surtout quand elles sont poreuses (116). Au moment où l'adhésion s'établit il se produit de la chaleur comme avec les liquides. S'il y a un mélange de gaz qui puissent se combiner, la température s'élève quelquefois assez pour que la combinaison s'effectue. C'est ce qui a lieu quand on met du fil ou de l'*éponge* de platine

dans un mélange d'oxigène et d'hydrogène, ou quand on souffle ce dernier gaz sur l'éponge à travers l'air. Si le platine est mêlé avec des substances inertes la combinaison se fait peu à peu, mais s'il est pur la température s'élève jusqu'au rouge, et il y a détonation. C'est à M. Dobereiner qu'on doit la connaissance de cette propriété qu'a le platine de déterminer la combinaison des gaz. MM. Dulong et Thénard ont depuis constaté que plusieurs autres substances jouissaient de la même propriété; le palladium, le rhodium et l'iridium l'ont comme le platine, à la température ordinaire; l'or à 120° seulement; le charbon, la pierre ponce, le verre, la porcelaine à 250°.

Solidification. Liquéfaction. Compression.

1349. Nous savons qu'il se dégage de la chaleur pendant la solidification des liquides (1190), la liquéfaction des vapeurs (1195), la compression des gaz (1172). Il s'en dégage aussi, mais très peu, pendant la compression des liquides, car MM. Colladon et Sturm n'ont pas obtenu avec de l'éther plus de 5 à 6° d'élévation par une compression brusque de 40 atmosphères, ou par le choc d'un coup de marteau. L'effet était encore moindre sur les autres liquides. Ils se servaient du thermomètre de Bréguet (894).

Percussion.

1350. Quant aux solides, on sait par exemple que les pièces de monnaie s'échauffent sous les coups du balancier; mais comme l'effet a lieu même quand la pièce ne change plus de densité, on doit l'attribuer plutôt à la percussion qu'à la diminution de volume. Un forgeron adroit parvient à faire rougir une barre de fer à force de la frapper sur son enclume. Il est naturel de croire que l'inflammation des amorces fulminantes est due à la chaleur dégagée par la percussion.

Frottement.

1351. Le frottement est un des moyens les plus puissants de produire de la chaleur; mille expériences vulgaires le démontrent; ainsi, les limes, les forets, les outils employés sur le tour s'échauffent jusqu'à brûler la main; les roues prennent feu quelquefois par le frottement sur les essieux; on fait aisément fumer deux morceaux de bois en les frot-

tant l'un contre l'autre; c'est, comme on sait, un moyen employé par les sauvages pour se procurer du feu. Le briquet ordinaire est aussi fondé sur le frottement; le silex arrache des parcelles d'acier qui, étant ainsi échauffées jusqu'à rougir, brûlent dans l'air et forment les étincelles. L'oxide de fer qui en résulte fond et tombe en petits globules qu'il est aisé de recueillir sur du papier. L'acier réussit mieux que le fer, parce qu'étant plus dur les parcelles sont plus petites et qu'il faut un frottement plus rude pour les arracher. Avec deux silex on obtient aussi du feu, mais non de véritables étincelles, parce que les parcelles détachées ne peuvent que rougir. Il en serait de même de l'acier dans le vide (527). Dans les véritables briquets phosphoriques le phosphore qu'on prend au bout de l'allumette s'échauffe et s'enflamme par le frottement ; c'est encore la chaleur due au frottement sur le papier à l'émeri qui explique le jeu des briquets dont les allumettes sont garnies de poudre fulminante. Nous indiquerons encore deux expériences remarquables, en ce qu'elles peuvent donner la mesure de la chaleur produite par le frottement; la première, qui est de Davy, consiste à fondre de la glace en en frottant deux morceaux l'un contre l'autre ; la seconde est de Rumford. Ce physicien, en faisant tourner l'une sur l'autre, à l'aide d'une machine à forer les canons, deux pièces de bronze plongées dans l'eau, finit par mettre ce liquide en pleine ébullition.

1352. L'électricité, comme moyen de produire de la chaleur, est tout-à-fait comparable aux actions chimiques les plus énergiques. Nous verrons qu'avec l'électricité on fond les métaux les plus réfractaires plus facilement encore qu'avec le chalumeau d'oxigène et d'hydrogène. D'ailleurs certains effets de la foudre montrent la puissance calorifique de cet agent. Électricité.

1353. Les sources de chaleur que nous venons d'examiner sont en quelque sorte artificielles ou n'ont qu'une existence momentanée, mais la nature nous en présente 2° Sources constantes.

qui ont une durée indéfinie ou qui sont remarquables par leur reproduction constante.

Chaleur du soleil.

Sa cause probable.

1354. Il est naturel de croire que la chaleur du soleil est due à une combustion; sans doute l'imagination s'effraie de la durée du phénomène, mais sur notre planète même nous voyons dans les volcans des combustions qui durent depuis des milliers d'années et il n'y a pas de comparaison à faire pour les dimensions. D'ailleurs l'incandescence du soleil aura probablement un terme comme celle de plusieurs étoiles qui ont disparu. Nous reconnaîtrons en optique que la partie visible de cet astre est une matière analogue à la flamme et non pas un corps solide incandescent.

Mesure approximative.

1355. On peut avoir une mesure approximative de la chaleur dans le soleil même, en prenant celle des rayons solaires pour terme de comparaison. Imaginons que la surface entière du ciel rayonne comme le soleil; un corps placé dans cette enceinte recevra autant de chaleur que s'il était dans le soleil même, car la chaleur reçue ne dépend pas du rayon de l'enceinte (1245). Or le soleil n'occupe que la 184000e partie de la sphère céleste ; la chaleur de cet astre serait donc 184000 fois aussi grande que celle que nous recevons.

Concentration des rayons solaires par la réflexion.

1356. La concentration des rayons solaires offre un des moyens les plus puissants de produire de la chaleur. En faisant tomber sur un même point les rayons réfléchis par un grand nombre de petits miroirs plans, Buffon enflammait du bois à plus de 200 pieds ; à 45 pieds il mettait l'argent en fusion. Ces expériences rendent plus probable ce qu'on raconte des miroirs ardents d'Archimède. On sait que les anciens se servaient de coupes pour obtenir le feu du ciel, et cela peut se concevoir quand on observe que le très petit miroir concave, formé par la boîte d'une montre, suffit pour enflammer l'amadou.

—Par la réfraction.

1357. Les verres sont préférables aux miroirs pour concentrer la chaleur du soleil, d'abord parce qu'il y a moins de perte par la transmission que par la réflexion et ensuite parce qu'il est plus aisé d'exposer un corps aux

rayons qui viennent d'en-haut. Parmi les lentilles les plus puissantes on peut citer celle de Trudaine avec laquelle Lavoisier et Brisson firent de nombreuses expériences au Louvre. Cette lentille était formée par deux glaces courbes accolées ; on remplissait la cavité interceptée avec 140 pintes d'esprit-de-vin. Le diamètre était de 4 pieds, et le foyer qui se formait à 10 pieds environ avait 15 lignes de largeur ; mais au moyen d'une seconde lentille on réduisait cette largeur à 8 lignes, de sorte que les rayons tombant sur les lentilles étaient concentrés dans un espace 5184 fois plus petit. En évaluant la perte par réflexion et absorption à $\frac{1}{5}$, on voit que la chaleur produite devait être environ 4000 fois plus forte que celle du soleil. Il est à remarquer cependant qu'on n'a pu fondre au foyer ni le cristal de roche, ni le platine. Nous parlerons dans l'optique des lentilles à échelons que Fresnel a substituées aux lentilles creuses.

Chaleur de la terre.

1358. Il y a, comme nous savons, une certaine chaleur dans l'intérieur de la terre (870) ; elle provient, suivant M. Poisson, de ce que notre planète a traversé des régions d'une température élevée où elle s'est échauffée jusqu'à une certaine profondeur (878). La chaleur des parties superficielles est à peu près dissipée, mais il reste celle des couches profondes. Dans cette manière de voir, une période de quelques centaines de siècles suffit pour expliquer les changements de température démontrés par la géologie et l'histoire naturelle fossile. Dans l'ancienne hypothèse de la chaleur centrale, il faudrait remonter à des millions de millions d'années pour trouver dans les régions septentrionales une température convenable à certains êtres organisés, qu'on sait y avoir vécu. Ampère n'admettait pas non plus l'hypothèse de la chaleur centrale ; seulement il supposait qu'une couche du globe peu épaisse et peu éloignée de la surface était le siége d'actions chimiques, du genre de celles qui produisent les volcans ; c'est ainsi qu'il expliquait l'accroissement de température avec la profondeur.

Chaleur animale ; sa source principale.

1359. Nous savons qu'il y a dans certains animaux une

source de chaleur qui maintient leur température au même degré, malgré les pertes continuelles par le rayonnement et le contact de l'air (865). Or, ces animaux, de même que des foyers en combustion, consomment une quantité considérable d'air, émettant continuellement comme eux de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique, en remplacement de l'oxigène absorbé. Il est évident, d'après cela, que la chaleur animale est due au moins en partie aux phénomènes chimiques de la respiration. Il n'y a pas de raison de croire que la formation de l'acide carbonique produise moins de chaleur dans ce cas que dans les autres; en partant de là, on trouve que la moitié au moins de la chaleur animale s'explique par la formation de ce gaz; terme moyen, c'est les six dixièmes. L'acide carbonique dégagé ne représente pas tout l'oxigène qui disparaît; en admettant que le reste soit employé à former de l'eau, on retrouve encore environ deux dixièmes, de sorte que les phénomènes chimiques de la respiration rendent compte de plus des trois quarts de la chaleur animale. Ces résultats sont dus aux travaux de MM. Dulong et Despretz. Les animaux soumis aux expériences étaient enfermés dans une boîte en cuivre mince, entièrement plongée dans l'eau; à l'aide d'un gazomètre on faisait passer de l'air pur dans la boîte; un autre gazomètre recevait l'air vicié qu'on analysait pour déterminer combien il avait disparu d'oxigène et combien il s'était formé d'acide carbonique. On calculait d'après cela la chaleur due aux actions chimiques (1329) et on la comparait à la chaleur réellement produite, dont on avait la mesure par l'échauffement de l'eau qui entourait la boîte. Les expériences duraient une ou deux heures. Pour n'avoir pas à tenir compte de la chaleur latente de la vapeur d'eau qui sort des poumons, l'air de la boîte où se trouvait l'animal était toujours saturé, de sorte que la vapeur se condensait dès qu'elle était expulsée et donnait ainsi sa chaleur latente à l'appareil.

Réfutation des objections.

1360. Brodie, en comparant le refroidissement de deux animaux dont la moelle épinière était coupée, mais dans

l'un desquels on entretenait la respiration par l'insufflation, avait trouvé que celui-ci se refroidissait plus vite; d'où il avait conclu que la respiration était une cause de refroidissement plutôt qu'une source de chaleur. Legallois fit voir que le refroidissement dans ce cas tenait à ce qu'on insufflait dans la poitrine une énorme quantité d'air comparativement à celle qu'emploie l'animal pendant la vie; l'air en excès ne servait qu'à enlever de la chaleur. Chaussat, ayant observé que la température restait d'autant plus élevée que la section de la moelle était faite plus loin de l'occipital, avait conclu que la chaleur animale dépendait de l'influence nerveuse et non de la respiration. Mais il est évident que les effets qui suivent la section de la moelle à diverses hauteurs, tels que les modifications de la circulation, de la contraction musculaire, etc., influent sur les phénomènes chimiques eux-mêmes en changeant, par exemple, la quantité de sang qui traverse les poumons dans un temps donné. Tout ce qu'on peut conclure des expériences de Chaussat, c'est que la puissance nerveuse, sans doute par son influence sur la circulation, la nutrition, les sécrétions, etc., est en partie la source de la chaleur animale; mais d'après ce que nous venons de voir, la respiration est certainement la source principale. Une preuve encore bien évidente, c'est que la température des animaux est d'autant plus élevée qu'ils consomment plus d'air. Les reptiles et les poissons en consomment infiniment moins que les oiseaux et les mammifères; d'après les expériences de M. de Humboldt, la cinquante millième partie de ce qu'il faut à un homme suffit à une tanche. Spallanzani a constaté que les animaux hibernants, à sang chaud, tels que les marmottes, les chauves-souris, etc., se refroidissent graduellement à mesure que leur respiration diminue.

Chaleur produite par l'homme.

1361. On peut calculer approximativement la chaleur que produit l'homme en 24 heures. En prenant une moyenne entre les observations, on trouve qu'un homme qui respire 20 fois par minute, et qui à chaque inspiration prend 650 centimètres cubes d'air, fait disparaître 780 litres d'oxi-

gène en 24 heures, pour produire 590 litres d'acide carbonique, et 218 grammes d'eau, répondant à la combustion de $0^k,323$ de carbon et $0^k,028$ d'hydrogène. Il se produit donc 2556 + 661 unités de chaleur (1329). Cette somme, d'après ce qu'on vient de voir, forme environ les trois quarts de la chaleur totale, qui s'élève par conséquent à 4025 unités; quantité suffisante pour faire bouillir $40^k,25$ d'eau prise à zéro, ou pour fondre $53^k,6$ de glace (1185).

§ III. *Théorie de la chaleur.*

La chaleur n'a pas de pesanteur appréciable.

1362. L'expérience prouve qu'un boulet chauffé jusqu'au rouge ne pèse pas plus que quand il est froid. Qu'on verse dans un flacon bouché à l'émeri de l'acide sulfurique et de l'eau, de manière à ne pas les mêler; qu'on pèse le flacon, puis qu'on agite; il se produira une énorme quantité de chaleur, et cependant le poids ne changera pas. Ces expériences et une foule d'autres montrent que la chaleur n'a pas de pesanteur sensible.

Analogie entre la chaleur rayonnante et du son.

1363. De même que le boulet dont nous venons de parler, un timbre suspendu au bras d'une balance, ne pèse ni plus ni moins quand il résonne. Le son qu'il produit se propage en tout sens, ainsi que la chaleur; et dans les deux cas l'intensité est en raison inverse du carré de la distance (673), (1242). Les rayons de chaleur et les rayons sonores se réfléchissent suivant les mêmes lois (669), (1253); les uns comme les autres, ils se transmettent à travers certaines substances et donnent à la surface qu'ils frappent la propriété de rayonner à son tour; en un mot, la chaleur et le son présentent tant d'analogie dans leurs propriétés qu'on doit naturellement admettre de l'analogie dans leur nature; or, le son consiste dans un mouvement vibratoire; il est donc rationnel d'expliquer aussi par un mouvement vibratoire les phénomènes de la chaleur.

Existence de l'éther.

1364. Il est certain que le mouvement vibratoire qui constitue la chaleur n'a pas besoin d'air pour se transmettre, ni d'aucune matière *pondérable* (1241). Nous sommes donc amenés à admettre, pour expliquer cette

transmission, une matière *impondérable*, remplissant ce que nous appelons le *vide*, soit dans les espaces célestes, soit entre les molécules des corps ; l'existence de cette matière, qu'on désigne sous le nom d'*éther*, est d'ailleurs aujourd'hui pleinement démontrée par les phénomènes de la lumière. On doit se représenter l'éther comme un fluide analogue aux gaz, mais d'une ténuité infiniment plus grande. Les phénomènes astronomiques montrent qu'il a si peu de densité que depuis des milliers d'années la résistance qu'il oppose aux planètes n'a pas produit d'altération sensible dans leur mouvement; mais il paraît que l'effet est appréciable sur les comètes, dont la substance est, comme on sait, au moins aussi légère que le vide qu'on obtient dans les machines pneumatiques. Il n'y a pas moyen de coercer l'éther dans un espace ou de l'empêcher d'y pénétrer, parce que les intervalles entre les molécules pondérables qui forment les parois d'un vase sont pour lui ce qu'une large ouverture serait pour l'air.

Sa disposition dans la matière pondérable.

1365. La chimie fait voir que les derniers atomes de la matière pondérable, même dans les corps simples, ne restent pas isolés et sans liaison; ils se groupent en nombre déterminé pour former des assemblages qu'on ne peut plus détruire par des moyens mécaniques et auxquels par cette raison on conserve encore le nom d'atomes; mais pour éviter l'ambiguité nous leur donnerons celui de molécules. On conçoit sans peine qu'une certaine quantité d'éther entre dans la constitution de chaque molécule, en lui formant une sorte d'atmosphère et en s'interposant entre les atomes qui la composent. Les phénomènes de l'optique montrent que l'éther, appartenant ainsi à chaque molécule, diffère notablement du fluide libre soit par sa densité, soit par son élasticité.

Mode de vibration d'où résulte la chaleur.

1366. Voici maintenant l'idée que nous nous ferons, d'après M. Ampère, du mode de vibration qui constitue la chaleur. Dans le cas du son, chaque molécule fait ses vibrations en se déplaçant tout d'une pièce, sans que ni l'éther ni les atomes qui la composent aient de mouve-

ment relatif. Dans le cas de la chaleur, au contraire, ce sont les atomes et l'éther qui vibrent, le centre de gravité du système reste fixe. Nous pouvons nous figurer une molécule comme un timbre ou un diapason suspendu par un fil; les oscillations de cette espèce de pendule nous représenteront les mouvements par lesquels le son se produit, et les vibrations sonores seront une image des mouvements vibratoires qui produisent la chaleur. Nous savons qu'on pourrait faire vibrer le timbre par l'intermédiaire de l'air en produisant à une certaine distance un son semblable à celui qu'il peut rendre; il en est de même des molécules, par l'intermédiaire de l'éther ; mais de plus elles peuvent prendre l'unisson d'un mouvement vibratoire quelconque, car l'expérience prouve que les corps s'échauffent sous l'influence d'une source quelconque. Nous avons vu en acoustique une propriété analogue dans les membranes, dans les masses d'air et dans la plupart des corps (736).

Température.

1367. Il est facile actuellement de concevoir la définition que nous avons donnée de la chaleur (830). Quant à la *température*, c'est par rapport à la chaleur ce qu'est l'*intensité* par rapport au son; de même que deux instruments de timbre différent et qui ne sont nullement d'accord peuvent donner des sons d'une intensité parfaitement égale, de même deux molécules tout-à-fait différentes peuvent, sans vibrer à l'unisson, se trouver à la même température, et produire en nous une sensation de chaleur également forte. On voit d'après cela que la température dépend de la vitesse de vibration (687), et même qu'elle a pour mesure le carré de cette vitesse (673) (812); si donc on désigne par v, v', v''... les vitesses maximum de vibration des différents points matériels, la température sera représentée par $v + v'^2 + v''^2 +$ etc.

Quantité de chaleur.

1368. La *quantité* de chaleur dépend à la fois de la vitesse de vibration et de la quantité de matière qui vibre. Nous prendrons pour sa mesure, en chaque point, le produit de la masse vibrante par le carré de sa vitesse maximum, produit connu en mécanique sous le nom de

force vive, et qui a la propriété remarquable de rester constant lors de la communication des mouvements vibratoires. Ainsi la chaleur contenue dans un corps peut être représentée par la somme $mv^2 + m'v'^2 + m'' v''^2 +$ etc. Il est évident que deux corps, qui sont à la même température, peuvent ne pas contenir la même quantité de chaleur si les masses vibrantes sont différentes. Il en est dans ce cas comme de deux instruments qui donnent des sons d'égale intensité, avec des masses vibrantes différentes; dans un instrument à vent, par exemple, cette masse est si faible que le son cesse immédiatement ; au contraire, dans une cloche, la vibration continue un certain temps, de sorte qu'en définitive la force vive transmise à l'air est plus considérable dans ce dernier cas que dans l'autre.

Chaleur spécifique.

1369. Les tables des chaleurs spécifiques donnent la mesure de la masse vibrante dans les différents corps pris à poids égal (1145). On voit que cette masse est en général très petite dans les corps très lourds, de sorte qu'elle dépend plutôt du volume que du poids ; elle est la même dans les molécules des corps simples solides, malgré la différence de nature et de poids (1150). Il y a aussi égalité pour les molécules des gaz simples, mais la valeur absolue est moindre (1161). On peut conclure de là et des résultats relatifs aux gaz composés (1167), que la masse qui vibre pour produire de la chaleur est plutôt de la matière impondérable que de la matière pondérable, et qu'en tout cas la partie vibrante ne doit pas être confondue avec la masse totale.

Changement de volume.

1370. Si on mesure le volume d'un corps échauffé on le trouve plus grand, par la même raison qu'on trouverait une corde plus épaisse pendant sa vibration transversale ou une tige plus longue pendant qu'elle vibre longitudinalement (742). Il est évident que la répulsion entre les molécules voisines doit devenir plus forte, au moins par intervalles, lorsque la distance diminue par l'amplitude des vibrations. L'usage qu'on fait des changements de volume pour mesurer les températures est fondé sur ce qu'il y a

une liaison nécessaire et constante dans chaque substance entre le volume et la vitesse de vibration.

Changements d'état.

1371. Dans un solide la vitesse de vibration de chaque molécule ne peut pas dépasser certaines limites; il y a telle amplitude de vibration qui est incompatible avec la distance et la liaison actuelle des parties. Il arrive donc un moment où il y a séparation, de même qu'il y a rupture dans les corps sonores quand la vibration devient trop énergique; de là le passage à l'état liquide; le passage à l'état gazeux s'explique de même. Dans tous les cas, on conçoit qu'il puisse y avoir rupture dans les molécules mêmes dont les atomes se groupent ensuite dans un ordre différent, compatible avec l'état de vibration où ils se trouvent. Ce fractionnement des molécules, ou même un simple changement de forme peut rendre compte des anomalies qu'on observe dans la dilatation de certains corps (895), (902).

Chaleur latente.

1372. Si les atomes pondérables qui entrent dans la composition des molécules étaient complétement immobiles, la masse à mouvoir se réduirait à l'éther, et il est évident que dans ce cas il faudrait moins de force vive pour élever un corps à une température donnée. Or, quand on empêche un gaz de se dilater, à mesure qu'on l'échauffe, on gêne plus ou moins les mouvements des atomes. On conçoit donc qu'il faille moins de chaleur alors pour produire la même variation de température (1163). Réciproquement, en comprimant un gaz, les atomes pondérables dont on limite les excursions réagissent plus fortement sur l'éther, de sorte que la température s'élève. Les choses se passent alors à peu près comme quand on tend une corde pendant qu'elle vibre; le son qu'on entendait à peine se renforce aussitôt.

En général, les phénomènes de la chaleur latente dépendent de la force vive absorbée ou rendue par les atomes pondérables. Lorsqu'on échauffe de la glace prise à zéro, toute la force vive qu'on introduit est employée à mettre les atomes pondérables en vibration et dans une disposition nouvelle qui est incompatible avec l'état so-

lide, de sorte que la masse reste à zéro en se liquéfiant; la force vive est ensuite restituée peu à peu à l'éther, lors du changement d'état en sens inverse.

1373. On conçoit la propagation de la chaleur dans l'éther par analogie avec la propagation du son dans l'atmosphère; il est facile d'après cela de définir un rayon de chaleur (811). La transmission se fait à peu près de même dans certains corps où l'éther interposé diffère peu de l'éther libre; c'est le cas des corps diathermanes. Il n'y a pas d'échauffement sensible dans ce cas, parce que le mouvement vibratoire passe presque en entier d'une tranche à l'autre. Au contraire, dans les substances athermanes, une partie notable de la force vive reste dans les molécules; c'est en cela que consiste l'*absorption* de la chaleur. Même dans les corps diathermanes il y a toujours une absorption assez forte à la surface, à cause du changement de densité. La *réflexion* de la chaleur provient de la vibration qui s'établit alors, non pas dans les atomes pondérables, mais dans la couche superficielle de l'éther, de sorte que, comme la propagation, elle peut avoir lieu sans qu'il en résulte d'échauffement. On conçoit d'après cela pourquoi les corps athermanes qui absorbent le moins de chaleur sont ceux qui en réfléchissent le plus (1255).

Propagation de la chaleur.

Absorption.

Réflexion.

1374. Lorsque deux surfaces à la même température n'émettent pas la même quantité de chaleur, il faut conclure que les masses vibrantes sont différentes, précisément comme pour la chaleur spécifique. Il n'est pas étonnant, d'après cela, de voir les métaux rayonner moins que les autres substances. L'égalité des pouvoirs rayonnant et absorbant se conçoit aussi très bien dans la théorie actuelle de la chaleur; puisque la force vive ne se détruit pas (1370), une molécule doit évidemment rendre autant qu'elle a reçu.

Pouvoir rayonnant.

1375. Le refroidissement d'une molécule par le rayonnement se fait par le même mécanisme que l'affaiblissement du son d'un timbre suspendu dans l'air. Chaque vibration produit une onde qui parcourt le fluide en laissant en repos la partie qu'elle a traversée, mais dans laquelle

Refroidissement par rayonnement.

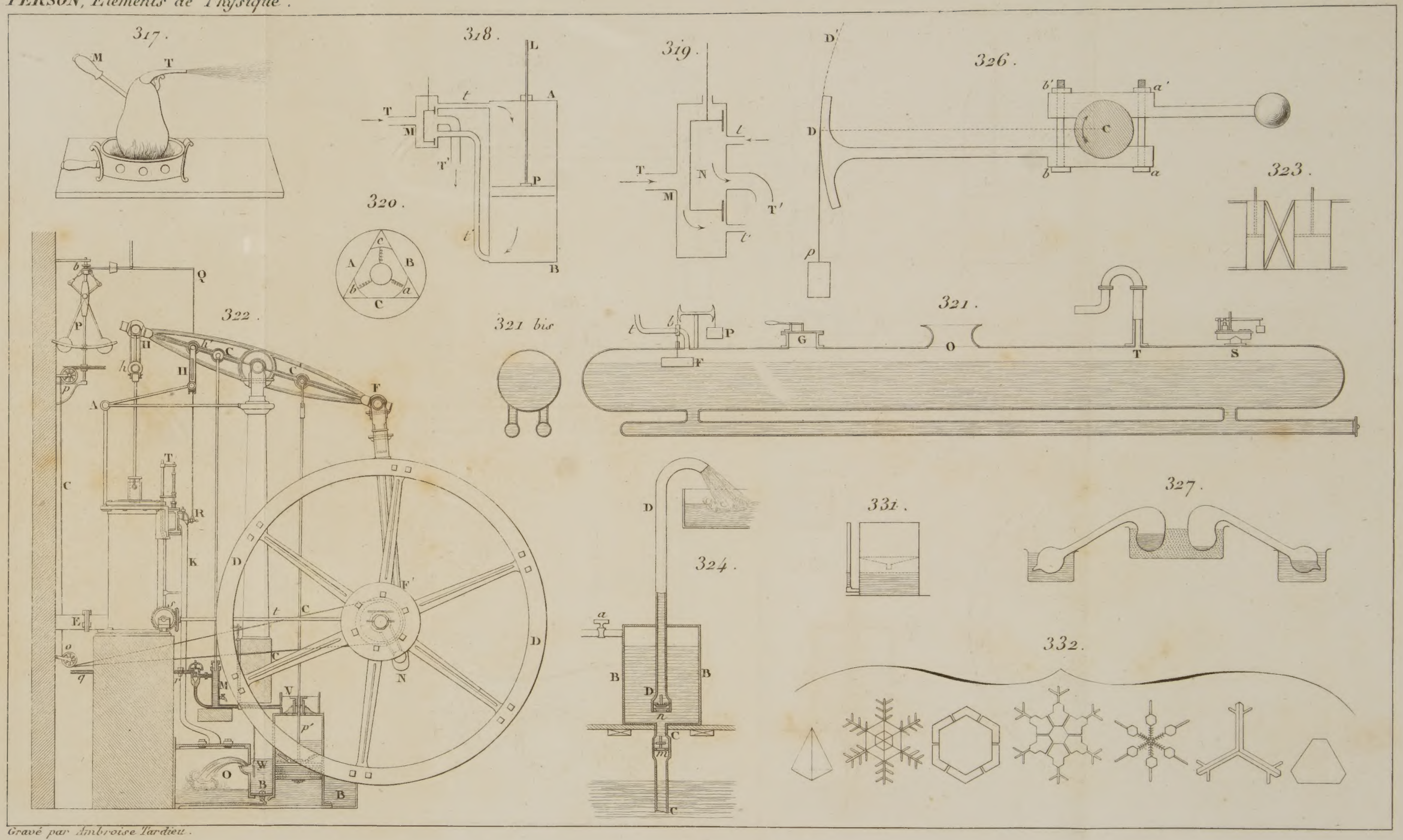
l'onde suivante vient à son tour produire du mouvement. A chaque vibration la force vive de la molécule diminue de toute la force vive qui passe dans l'onde, de sorte que les pertes successives vont en diminuant avec l'intensité des ondes produites. La formule de Dulong (1322) donnerait la mesure de la force vive perdue à chaque instant.

Conductibilité. 1376 La propagation de la chaleur dans un corps, par le rayonnement de molécule à molécule (1291), est analogue à la propagation du mouvement vibratoire entre des corps sonores qui ne se touchent point et entre lesquels l'air sert de moyen de communication. En général l'affaiblissement est très remarquable dans ce cas; il faut que le premier corps vibre très fortement pour influencer sensiblement le dernier; de plus, l'effet n'a lieu qu'au bout d'un temps assez long, qui dépend d'ailleurs de la distance, du nombre et de la nature des intermédiaires. On voit d'après cela que les phénomènes de la conductibilité pour la chaleur rentrent naturellement dans la théorie des mouvements vibratoires.

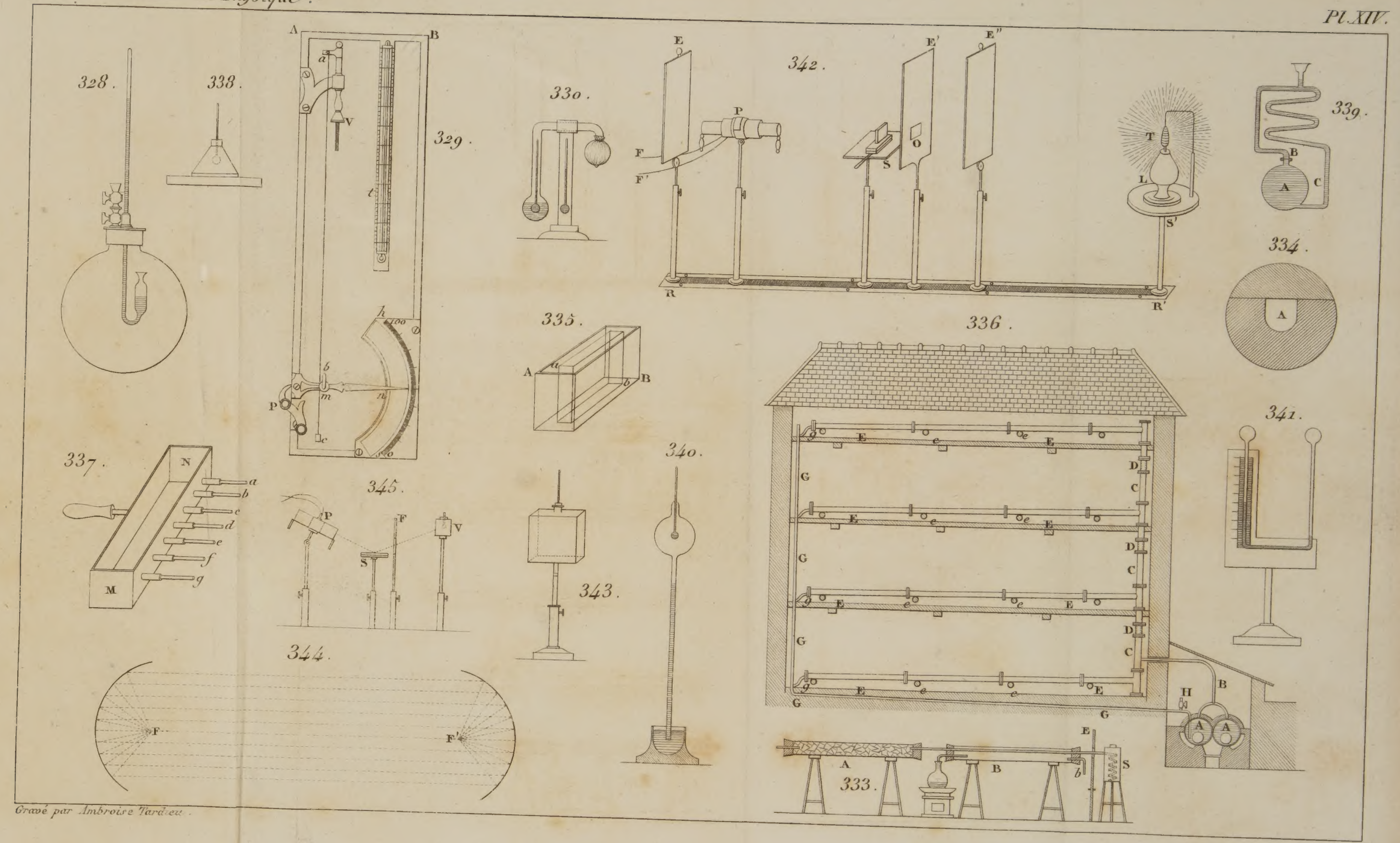
Production de la chaleur. 1377. Enfin, si on passe en revue les différents moyens de produire de la chaleur, tels que les actions chimiques, le frottement, etc., on verra qu'ils se réduisent en définitive à des opérations où les atomes doivent prendre des mouvements vibratoires plus ou moins énergiques, ce qui confirme encore la théorie dont nous venons de donner une idée.

FIN DE LA SECONDE PARTIE.

Gravé par Ambroise Tardieu.



Gravé par Ambroise Tardieu.



Gravé par Ambroise Tardieu.